

Estudo da Resistência ao Fogo de Pilares de Aço Inseridos em Paredes

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana

Autora

Carina Teixeira Simões

Orientador

Prof. Doutor António José Pedroso de Moura Correia

Professor Adjunto do DEC - ISEC

Coimbra, maio, 2016

Aos meus pais

Sei que o meu trabalho é uma gota no oceano, mas sem ele, o oceano seria menor

Madre Teresa

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho, com todas as dificuldades associadas, só foi possível com ajuda e apoio de várias pessoas a quem pretendo expressar o meu agradecimento.

Estou de uma forma distinta, agradecida ao Professor Doutor António José Pedroso de Moura Correia, pela orientação científica deste trabalho, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos, pelo incentivo constante, pela disponibilidade e dedicação, pela sua perseverança e, especialmente, pela sua amizade. Devo, ainda, ao Professor António Correia, a minha formação na área das estruturas ao fogo, ao longo da qual conseguiu, de uma forma especial, incutir-me o desejo de realizar este trabalho.

Manifesto também o meu agradecimento ao Professor da Universidade de São Paulo Fábio Rocha, colega nos laboratórios da Universidade de Coimbra, pela ajuda indispensável prestada na realização de grande parte dos trabalhos experimentais, dedicação e incentivo.

À Universidade de Coimbra que me disponibilizou o Laboratório de Estruturas e todo o material de apoio essencial à realização do programa experimental.

Ao Professor Doutor João Paulo Rodrigues pela ajuda prestada na realização dos ensaios experimentais.

Ao *ISISE – Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering*, pelas facilidades concedidas na utilização dos meios informáticos para a realização da parte numérica desta tese.

Aos meus colegas de curso com os quais realizei trabalhos de grupo e cruzei dúvidas, agradeço as árduas horas de estudo em conjunto.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram e estiveram presentes.

À minha família, especialmente aos meus queridos pais que sempre me apoiaram e incentivaram neste longo caminho, apesar de alguns obstáculos surgidos e finalmente, ao meu namorado Pedro por todo o apoio, incentivo, carinho e pela compreensão da minha ausência durante esta fase.

A todos, um MUITO OBRIGADA!

Carina Teixeira Simões

RESUMO

O comportamento ao fogo de pilares de aço inseridos em paredes de edifícios é substancialmente diferente dos pilares quando isolados. O contacto com as paredes provoca por um lado um efeito de redução das temperaturas, revelando-se de certa forma favorável em termos de comportamento ao fogo, mas por outro lado provocando um aquecimento diferencial das secções levando ao aparecimento de esforços desfavoráveis (momentos fletores) nos pilares, aumentando a instabilidade. Este último fenómeno designa-se de “*Thermal Bowing*”, provocado pelo aquecimento diferencial, deve ser avaliado por uma quantificação rigorosa das temperaturas nos perfis de aço.

O estudo foi realizado em dois níveis, numérico e experimental. Foram testados pilares inseridos em paredes de alvenaria, tanto com a alma paralela como perpendicular à parede. Pretendeu-se assim, avaliar o efeito da ação térmica diferencial no comportamento estrutural dos pilares e concluir qual o efeito das paredes sobre estes na sua resistência estrutural. Foram ainda alvo de análise o nível de carregamento e a esbelteza do pilar.

Compararam-se os resultados dos ensaios experimentais com os estudos numéricos, reproduzindo as condições utilizadas nos ensaios experimentais, por forma a contribuir para o desenvolvimento/melhoria dos métodos de dimensionamento dos pilares em situação de incêndio. O programa experimental comportou a realização de ensaios em pilares de aço de secção H, embebidos em paredes.

A modelação numérica dos ensaios foi realizada utilizando o programa de computador de elementos finitos ABAQUS, elaborando-se uma análise geométrica e material não - linear.

Os principais resultados deste trabalho de investigação foram uma melhor avaliação da evolução de temperaturas na secção transversal dos pilares de aço com aquecimento diferencial, inseridos em paredes, deslocamentos, forças de restrição e esforço axial daí decorrentes. A partir destes resultados, realizou-se uma análise detalhada do deslocamento do centro de gravidade ao longo do tempo, provocada pela degradação das propriedades mecânicas do aço.

Palavras-chave: Pilares, Paredes, Fogo, Dilatação Térmica Restringida, Resistência ao Fogo, Aço, Gradiente Térmico.

ABSTRACT

The fire behavior of steel columns inserted in building walls is substantially different from the bare columns. The contact with the walls causes on one hand the temperatures lowering effect, revealing itself in a favorable way in terms of fire behavior, but then causing a differential heating of the cross sections leading to the appearance of unfavorable efforts (bending moments), causing instability. This phenomenon is called "Thermal Bowing", caused by differential heating, and should be evaluated by an accurate quantification of temperatures in steel profiles.

The present study was conducted by two approaches, numerical and experimental. Steel columns were tested inserted in masonry walls, web parallel and perpendicular to the wall. It was intended to evaluate the effect of differential thermal action on the structural behavior of the columns, and the effect of these walls in its structural resistance. Still being analyzed the the load level and slenderness of the column.

The results of experimental studies were compared with the ones obtained in the numerical studies, replicating the conditions used in the experiments, so that the data provided would enable the development / improvement of the designing methods of columns under fire situation. The experimental programme comprised full scale tests in H section of steel columns embedded in the walls.

The numerical modeling of the tests was performed using the computer program finite element ABAQUS, conducting a geometric and material non-linear analysis.

The main results of this research were a better assessment of the evolution of the temperatures within the steel columns cross section, with differential heating in contact with the walls, displacement, restriction forces and axial forces resulting therefrom. From this study, a detailed evaluation of the displacement of the centroid along the time, provoked by the degradation of mechanical properties was presented.

Keywords: Columns, Walls, Fire, Restrained Thermal Expansion, Fire Resistance, Steel Gradient

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Considerações Gerais	1
1.2.	Objetivos da Pesquisa	4
1.3.	Estrutura da Dissertação	5
2.	ESTADO DA ARTE.....	7
2.1.	Considerações Gerais	7
2.1.2	Acidentes que envolveram incêndio	7
2.2.	Métodos Simplificados	9
2.3.	Métodos Avançados	12
2.4.	Estudos Numéricos e Experimentais	14
2.4.1	Estudos Numéricos	14
2.4.2	Estudos Experimentais	21
3.	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	35
3.1.	Condições Gerais.....	35
3.2.	Instalação Experimental	36
3.3.	Provetes de ensaio	44
3.4.	Procedimento de Ensaio	50
3.5.	Resultados	51
3.5.1.	Temperaturas	51
3.5.2.	Forças de restrição.....	54
3.5.3	Deslocamentos	55

4.	MODELAÇÃO NUMÉRICA	59
4.1.	Condições Gerais	59
4.2.	Modulação numérica com o programa ABAQUS.....	60
4.3.	Modelos numéricos	65
4.3.1.	Elementos finitos, malhas, interações e ação térmica do modelo em estudo	65
4.4.	Resultados	69
4.4.1.	Comparação Ensaios Numéricos vs Ensaios Experimentais	69
4.4.1.1	Análise das forças de restrição	70
4.4.1.2	Análise de temperaturas	71
4.4.1.3	Deslocamentos verticais	72
4.4.1.4	Análise das temperaturas	72
4.4.2.	Análise das forças de restrição.....	74
4.4.3	- Análise do deslocamento lateral.....	82
5.	ESTUDO ANALÍTICO DO FENÓMENO DE “<i>THERMAL BOWING</i>”.....	87
5.1	Propriedades do aço	87
5.1.1	Propriedades térmicas	87
5.1.2	Propriedades mecânicas	88
5.2	Análises.....	91
5.2.1	Temperaturas	91
5.2.2	Tensões de Von Mises.....	92
5.2.3	Evolução das deformadas	93
5.2.4	Redução da secção transversal ou Evolução das características geométricas	95
5.2.4.1	Coluna com a alma paralela à parede	96
5.2.4.2	Coluna com a alma perpendicular à parede	99
5.2.5	Redução da Tensão de Cedência.....	102
5.2.5.1	Coluna com a alma paralela à parede	102
5.2.5.2	Coluna com a alma perpendicular à parede	103

6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	105
6.1	Considerações finais	105
6.2	Principais conclusões	105
6.3	Desenvolvimentos futuros	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
7.	ANEXOS	113
7.1	Anexo I - Caracterização geométrica do perfil HEA 100	113
7.2	Anexo II – Desenvolvimento fotográfico dos ensaios experimentais.....	114
7.3	Anexo III – Marcha de cálculo das cargas de serviço para os diferentes níveis de carregamento	120
7.4	Anexo IV – Estudo da evolução da temperatura para o pilar com a alma paralela à parede (carregamento de 60%)	125
7.5	Anexo V – Estudo da evolução da temperatura para o pilar com a alma perpendicular à parede (carregamento de 30%)	127
7.6	Anexo VI – Imagens das simulações numéricas.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Torre de Windsor (Madrid) [1]	2
Figura 2.1 - Incêndio no Edifício Andraus, Brasil [2]	7
Figura 2.2 - Esquema da estrutura analisada e posicionamento da ação térmica, (Landesmann e Baptista (2005)).....	15
Figura 2.3 - Casos de estudo analisados por Silva (2006) a) viga de aço em contacto com laje e com a parede b) pilar em contacto com a parede (alma perpendicular) c) pilar em contacto com a parede (alma paralela) d) secção fechada de viga em contacto com a laje e a parede ..	16
Figura 2.4 - A figura (a) a localização do centro de gravidade, (b) componentes do momento, e (c) o desempenho P-M normalizado para uma coluna W14 × 314 submetida ao fogo em três lados e aplicada $P = 25\%$ da inicial P_y , (Garlock et al. (2006))	17
Figura 2.5 - Perfis de temperatura e tensões de cedência com a posição do eixo neutro em diferentes locais, (Garlock et al., 2008)	18
Figura 2.6 - Momentos fletores no pilar, esforços axiais na viga e deslocamento lateral no pilar – induzidos pela ação do incêndio, (Garlock et al., 2008).....	19
Figura 2.7 – Fórmulas dos fatores de massividade para os exemplos estudados por Érica Kimura (2009b).....	20
Figura 2.8 - Casos de estudo com a indicação da posição dos termopares na secção transversal, (Correia, Rodrigues e Silva, 2009 a))	20
Figura 2.9 - Diferentes valores dos fatores de forma analisados por Silva (2006) a) alma do pilar paralela à parede b) alma do pilar perpendicular à parede (vista em planta), (Pamplona Guimarães (2007))	22
Figura 2.10 - Incêndio localizado num pilar a) Geometria do ensaio b) Temperaturas medidas num pilar sem proteção, durante o ensaio, (Wald, 2009)	24
Figura 2.11 - Ensaios em pilares de aço inseridos em paredes a) preparação dos ensaios experimentais b) provete com a posição dos termopares, (Correia, Rodrigues e Silva, 2009 a)	25
Figura 2.12 - Pormenores dos provetes de ensaio (Wei-young Wang et al., 2009).....	26

Figura 2.13 - Curvas temperatura versus tempo para os dois pilares ensaiados, (Wei-young Wang et al., 2009).....	26
Figura 2.14 - Modelo tridimensional e malha de elementos finitos do pórtico de restrição e pilar a) pilar de aço em contacto com as paredes b) pilar de aço isolado, (Correia et al. 2010b)	27
Figura 2.15 - Instalações experimentais usadas nos ensaios de resistência ao fogo de pilares a) pilares em contacto com paredes b) pilar isolado (Correia, 2011)	29
Figura 2.16 - Variação dos tempos críticos de pilares de aço, em função da esbelteza para diferentes níveis de carregamento e diferentes tipos de rigidez da estrutura circundante, (Correia et al., 2012a)	30
Figura 2.17 - Análise da resistência plástica de um pilar de aço em contacto com paredes, com a alma do perfil paralela à parede, i.e, com o gradiente térmico ao longo dos banzos, (Correia et al., 2012b).....	31
Figura 2.18 - Análise da resistência plástica de um pilar de aço em contacto com paredes, com a alma do perfil perpendicular à parede, i.e, com o gradiente térmico ao longo da alma, (Correia et al., 2012b).....	31
Figura 2.19 - Instalação experimental a) Preparação dos ensaios na instalação experimental b) Esquema da instalação experimental do laboratório, (Dwaikat et al., 2012)	32
Figura 2.20 - Esquema do isolamento dos pilares, com as dimensões em milímetros, (Dwaikat et al., 2012)	32
Figura 2.21 - O aquecimento efetuado em diferentes locais da secção dos pilares W12x58 para a) o aquecimento uniforme de toda a secção (b) gradiente térmico ao longo da alma e (c) gradiente térmico ao longo dos banzos, (Anil Agarwal et al. (2014)).....	34
Figura 3.1 - Vista global do sistema experimental	36
Figura 3.2 - (a) Esquema de ensaio utilizado em Correia (2011), (b) Esquema de ensaio para pilares inseridos em paredes proposto, (c) Provete completo para ensaios em paredes.....	37
Figura 3.3 - Instalação experimental a) vista frontal b) pormenor da ligação viga-pilar dos pilares periféricos do pórtico de restrição.....	38
Figura 3.4 - Instalação de LVDT's a) no centro do pórtico, na parte superior b) no topo do pilar c) na base do pilar.....	39

Figura 3.5 - Medição das deformadas dos pilares, durante os ensaios, é possível visualizar a estrutura de apoio à instalação dos transdutores de fio a) perfil com a alma paralela b) perfil com a alma perpendicular	40
Figura 3.6 - Dispositivo de medição das forças axiais de origem térmica, durante os ensaios a) cilindro maciço revestido exteriormente com teflon b) posicionamento do dispositivo entre o provete e as vigas superiores do pórtico de restrição	40
Figura 3.7 - Pormenores de ligação entre as paredes, o pilar com a alma paralela às mesmas e o pórtico a) rasgos para posterior ancoragem da parede à coluna de teste b) ligação pilar – parede c) ancoragem da ligação pilar – parede	41
Figura 3.8 - Pormenores de ligação entre as paredes, o pilar com a alma perpendicular às mesmas e o pórtico a) rasgos para posterior ancoragem da parede à coluna de teste b) ligação pilar – parede c) ancoragem da ligação pilar – parede.....	42
Figura 3.9 - Posicionamento do forno na instalação experimental a) vista lateral, lado esquerdo b) vista lateral, lado direito, (Correia, Rodrigues e Silva (2009 a,b))	42
Figura 3.10 - Equipamento de apoio aos ensaios a) data logger b) central servo-hidráulica de controle do macaco hidráulico	43
Figura 3.11 - Representação visual instantânea de alguns resultados durante o ensaio	43
Figura 3.12 - a) Secção transversal do pilar metálico em conjunto com as chapas de topo soldada b) Altura do pilar.....	44
Figura 3.13 - Provetes de ensaio com localização dos termopares a) vista lateral b) secção transversal com perfil tendo a alma perpendicular à parede c) secção transversal com perfil tendo a alma paralela à parede	45
Figura 3.14 - a) Posicionamento dos ganchos para ancoragem da parede b) Detalhe do quadro onde foram executadas as paredes	46
Figura 3.15 - Casos analisados no programa experimental	48
Figura 3.16 - Colocação do pilar HEA 100 no pórtico de restrição para o ensaio isolado a) vista lateral do pilar b) vista lateral – localização dos termopares.....	48
Figura 3.17 - Colocação das paredes de alvenaria no pórtico de restrição para ambos os ensaios a) vista lateral – pilar com a alma paralela à parede b) vista frontal – pilar com a alma perpendicular à parede	49

Figura 3.18 - Paredes de alvenaria no pórtico de restrição para ambos os ensaios a) vista lateral – pilar com a alma paralela à parede, antes da colocação do forno b) vista lateral – pilar com a alma perpendicular à parede, após a colocação do forno.....	49
Figura 3.19 - Pilar isolado a) antes do ensaio b) no final do ensaio.....	56
Figura 3.20 - Deformada após ensaio do pilar no caso da alma perpendicular à parede a) vista lateral antes da fissuração das paredes b) vista frontal depois da fissuração das paredes	57
Figura 3.21 - Provete durante o ensaio, caso com a alma paralela à parede a) vista frontal, são visíveis através das fissurações as resistências do forno b) vista lateral do provete, denota-se a formação da “barriga” da deformada.....	57
Figura 3.22 – Provete de ensaio com a alma perpendicular à parede a) antes do ensaio b) após o ensaio, onde se podem observar as fissuras das paredes e a deformada do pilar	58
Figura 4.1 - Definição das partes do modelo no módulo "Part" a) pilar b) parede	60
Figura 4.2 - Construção do modelo a) algumas partes colocadas lado a lado b) modelo após montagem	61
Figura 4.3 - Interação entre partes a) Convecção na parede b) Convecção no pilar	62
Figura 4.4 - Interação entre piston e pilar	63
Figura 4.5 - Aplicação de carga no módulo “Load” a) aplicação do peso próprio b) aplicação da carga de ensaio do pilar e do peso próprio.....	63
Figura 4.6 - Geração das malhas de elementos finitos no módulo “Mesh” a) no pilar b) estrutura global	64
Figura 4.7 - Visualização de resultados no pilar e paredes após ensaios a) temperaturas nodais b) tensões axiais no pilar de ensaio	65
Figura 4.8 – Visualização da malha de elementos finitos a) no pórtico de restrição e provete b) detalhe do elemento finito C3D8RT	66
Figura 4.9 - Procedimento usado nas simulações numéricas para simular a aplicação da carga axial a aplicar sobre os pilares de aço.....	67
Figura 4.10 - Corte horizontal a 50 cm da base nos modelos simulados a) secção com alma paralela à parede b) secção com alma perpendicular à parede	68
Figura 5.1 - Tens após o ensaio a) alma paralela à parede b) alma perpendicular à parede ...	92

Figura 5.2 - Evolução de temperaturas e deformada do pilar - simulação do ensaio PAR-K13-LL30.....	94
Figura 5.3 - Evolução de temperaturas e deformada do pilar - simulação do ensaio PER-K13-LL30.....	95
Figura 5.4 - Diagramas de tensões para os perfis de aço sujeitos ao aquecimento diferencial, no caso de um perfil com a alma paralela à parede (gradiente térmico ao longo da alma) ...	102
Figura 5.5 - Diagramas de tensões para os perfis de aço sujeitos ao aquecimento diferencial, no caso de um perfil com a alma perpendicular à parede (gradiente térmico ao longo do banzo).....	103
Figura 7.1 - Definição geométrica do perfil HEA 100	113
Figura 7.2 - Rebarbagem para correta soldagem dos termopares	114
Figura 7.3 - Todas as zonas de colocação dos termopares rebarbadas	114
Figura 7.4 - Vista da instrumentação do pilar isolado	114
Figura 7.5 - Pormenor da instrumentação do pilar isolado	114
Figura 7.6 - Vista global da colocação do pilar isolado no forno	115
Figura 7.7 - Pormenor de colocação dos termopares – 1	115
Figura 7.8 - Pormenor de colocação dos termopares – 2	115
Figura 7.9 - Pormenor de colocação dos termopares – 3	115
Figura 7.10 - Pormenor de colocação dos termopares – 4	115
Figura 7.11 - Transdutor de deslocamento - Base	115
Figura 7.12 - Central servo-hidráulica de controlo do macaco hidráulico	116
Figura 7.13 - Ecrã da central servo-hidráulica de controlo do macaco hidráulico	116
Figura 7.14 - Construção das paredes	116
Figura 7.15 - Pormenor de cortes na parede, para posteriores ancoragens.....	116
Figura 7.16 - Transporte das paredes para o pórtico de ensaio - 1	116
Figura 7.17 - Transporte das paredes para o pórtico de ensaio - 2	116
Figura 7.18 - Execução de juntas de ancoragem – alma paralela à parede.....	117
Figura 7.19 - Isolamento do conjunto de ensaio	117

Figura 7.20 - Vista global do sistema de ensaio - 1.....	117
Figura 7.21 - Vista global do sistema de ensaio - 2.....	117
Figura 7.22 - Pormenor de carregamento	118
Figura 7.23 - Fendas verticais observadas no pilar com a alma paralela	118
Figura 7.24 - Preparação do ensaio com a alma perpendicular às paredes - 1	118
Figura 7.25 - Preparação do ensaio com a alma perpendicular às paredes - 2.....	118
Figura 7.26 - Pormenor da zona de ancoragem, já com a instrumentação.....	119
Figura 7.27 - Vista lateral do sistema de ensaio do pilar com a alma perpendicular à parede.	119
Figura 7.28 - Fendas observadas no pilar com a alma perpendicular à parede	119
Figura 7.29 - Sistema global.....	119
Figura 7.30 - Aplicação da carga de ensaio do pilar	124
Figura 7.31 - Divisões das secções no pilar	125
Figura 7.32 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 1.....	125
Figura 7.33 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 2.....	126
Figura 7.34 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 3.....	126
Figura 7.35 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 4	126
Figura 7.36 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 5.....	126
Figura 7.37 - Divisões das secções no pilar	127
Figura 7.38 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 1.....	127
Figura 7.39 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 2.....	128
Figura 7.40 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 3.....	128
Figura 7.41 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 4.....	128
Figura 7.42 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 5.....	128
Figura 7.43 - Tensões de Von Mises para a simulação sem piston.....	129
Figura 7.44 - Tensões de Von Mises para a simulação com piston	129
Figura 7.45 - Temperaturas para a simulação sem piston	129

Figura 7.46 - Temperaturas para a simulação com piston	129
Figura 7.47 - Deslocamentos laterais para a simulação sem <i>piston</i>	130
Figura 7.48 - Deslocamentos laterais para a simulação com piston	130
Figura 7.49 - Deslocamentos verticais para a simulação sem <i>piston</i>	130
Figura 7.50 - Deslocamentos verticais para a simulação com piston	130
Figura 7.51 - Vista global	131
Figura 7.52 - Vista global, observa-se as interações.....	131
Figura 7.53 - Aplicação da convecção e radiação à parede	131
Figura 7.54 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar	131
Figura 7.55 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao primeiro módulo do forno	132
Figura 7.56 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao primeiro módulo do forno - pormenor	132
Figura 7.57 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao primeiro módulo do forno	132
Figura 7.58 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao primeiro módulo do forno - pormenor	132
Figura 7.59 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao segundo módulo do forno	133
Figura 7.60 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao segundo módulo do forno - pormenor	133
Figura 7.61 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao segundo módulo do forno	133
Figura 7.62 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao segundo módulo do forno-pormenor	133
Figura 7.63 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao terceiro módulo do forno	133
Figura 7.64 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao terceiro módulo do forno - pormenor	133

Figura 7.65 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao terceiro módulo do forno	134
Figura 7.66 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao terceiro módulo do forno -pormenor.....	134
Figura 7.67 - Vista global para observação das temperaturas, caso com a alma paralela à parede – parte aquecida	134
Figura 7.68 - Vista pormenorizada das temperaturas (a meia altura), caso com a alma paralela à parede – parte aquecida.....	135
Figura 7.69 - Vista pormenorizada das temperaturas (a meia altura), caso com a alma paralela à parede – parte não aquecida.....	135
Figura 7.70 - Vista global para visualização das temperaturas, caso com a alma perpendicular à parede – parte aquecida.....	135
Figura 7.71 - Vista pormenorizada das temperaturas (a meia altura), caso com a alma perpendicular à parede – parte aquecida.....	136
Figura 7.72 - Vista pormenorizada das temperaturas (a meia altura), caso com a alma perpendicular à parede – parte não aquecida.....	136
Figura 7.73 - Seleção das tensões verticais para o meio banzo exposto, caso do pilar com a alma paralela à parede	136
Figura 7.74 - Seleção das tensões verticais para o meio banzo não exposto.....	136
Figura 7.75 - Seleção das tensões verticais para a alma, caso do pilar com a alma paralela à parede.....	137
Figura 7.76 - Seleção das tensões verticais para toda a secção do perfil (a meia altura), caso do pilar com a alma paralela à parede	137
Figura 7.77 - Seleção das tensões verticais para o banzo exposto, caso do pilar com a alma perpendicular à parede.....	137
Figura 7.78 - Seleção das tensões verticais para o banzo não exposto, caso do pilar com a alma perpendicular à parede	137
Figura 7.79 - Seleção das tensões verticais para a alma, caso do pilar com a alma perpendicular à parede.....	137

Figura 7.80 - Seleção das tensões verticais para toda a secção do perfil (a meia altura), caso do pilar com a alma perpendicular à parede	137
Figura 7.81 - Vista global para observação dos deslocamentos verticais, caso com a alma paralela à parede.....	138
Figura 7.82 - Pormenorização dos deslocamentos laterais caso com a alma paralela à parede	138
Figura 7.83 - Pormenorização dos deslocamentos laterais, a meia altura do pilar caso com a alma paralela à parede.....	138
Figura 7.84 - Vista global para visualização dos deslocamentos laterais, caso com a alma perpendicular à parede	139
Figura 7.85 - Pormenorização dos deslocamentos laterais caso com a alma perpendicular à parede	139
Figura 7.86 - Pormenorização dos deslocamentos laterais, a meia altura do pilar caso com a alma perpendicular à parede	139
Figura 7.87 - Vista global para visualização dos deslocamentos verticais, caso com a alma paralela à parede.....	140
Figura 7.88 - Pormenorização dos deslocamentos verticais caso com a alma paralela à parede	140
Figura 7.89 - Pormenorização dos deslocamentos verticais, a meia altura do pilar caso com a alma paralela à parede.....	140
Figura 7.90 - Vista global para visualização dos deslocamentos verticais, caso com a alma perpendicular à parede	141
Figura 7.91 - Pormenorização dos deslocamentos verticais caso com a alma perpendicular à parede	141
Figura 7.92 - Pormenorização dos deslocamentos verticais, a meia altura do pilar caso com a alma perpendicular à parede	141
Figura 7.93 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=0 min	142
Figura 7.94 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=20 min	142
Figura 7.95 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=40 min	142
Figura 7.96 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=60 min	142

Figura 7.97 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=80 min	143
Figura 7.98 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=100 min	143
Figura 7.99 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=120 min	143
Figura 7.100 - Temperaturas para a deformada final	143
Figura 7.101 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=0 min.....	144
Figura 7.102 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=20 min.....	144
Figura 7.103 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=40 min.....	144
Figura 7.104 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=60 min.....	144
Figura 7.105 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=80 min.....	145
Figura 7.106 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=100 min.....	145
Figura 7.107 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=120 min.....	145
Figura 7.108 - Temperaturas para a deformada final	145
Figura 7.109 - Tensões de Von Mises para a simulação sem <i>piston</i> , caso com a alma paralela à parede.....	146
Figura 7.110 - Tensões de Von Mises para a simulação com <i>piston</i> , caso com a alma paralela à parede.....	146
Figura 7.111 - Tensões de Von Mises para a simulação sem piston, caso com a alma perpendicular à parede.....	146
Figura 7.112 - Tensões de Von Mises para a simulação com piston, caso com a alma perpendicular à parede.....	146
Figura 7.113 - Temperaturas para a simulação sem piston, caso com a alma paralela à parede	147
Figura 7.114 - Temperaturas para a simulação com piston, caso com a alma paralela à parede	147
Figura 7.115 - Temperaturas para a simulação sem piston, caso com a alma perpendicular à parede.....	147
Figura 7.116 - Temperaturas para Von Mises para a simulação com <i>piston</i> , caso com a alma perpendicular à parede.....	147

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Quadro de dimensionamento, (EN 1993-1-2:2010)	9
Quadro 2.2 - Fator de massividade (A_m/V) para elementos de aço não protegidos, Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010)	11
Quadro 3.1 - Capacidade de carga do pilar HEA 100 à temperatura ambiente	47
Quadro 3.2 - Detalhe dos provetes do programa experimental	47
Quadro 4.1 - Casos das diferentes simulações numéricas realizadas	69
Quadro 4.2 - Resumo dos valores de P/P_0 retirados dos gráficos anteriores	77
Quadro 5.1 - Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas, EN 1993-1-2 (2010)	90
Quadro 5.2 - Temperaturas para o perfil com a alma paralela à parede	92
Quadro 5.3 - Temperaturas para o perfil com a alma perpendicular à parede.....	92
Quadro 5.4 - Redução dos fatores da tensão de cedência efetiva em relação à tensão de cedência a 20°C, em função da temperatura (EN 1993-1-2:2010)	96
Quadro 5.5 - Análise do deslocamento do Centro de Gravidade devido ao aumento da temperatura para o perfil com a alma paralela à parede (gradiente térmico ao longo da alma)	96
Quadro 5.6 - Análise do deslocamento do Centro de gravidade devido ao aumento da temperatura para o perfil com a alma perpendicular à parede (gradiente térmico ao longo do banzo).....	99
Quadro 7.1 - Informações técnicas dos perfis de aço HEA 100	113
Quadro 7.2 - Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura	121
Quadro 7.3 - Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura	123

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Temperatura média nos vários módulos do forno e curva de incêndio padrão, ISO 834, para o ensaio do pilar isolado.....	51
Gráfico 3.2 – Temperatura média nos vários modelos do forno e curva ISO 834 a) para o caso do pilar com a alma paralela à parede b) para o caso do pilar com a alma perpendicular à parede.....	52
Gráfico 3.3 - Temperatura média por secções – caso do pilar isolado	53
Gráfico 3.4 - Temperatura média por secções a) caso do pilar com a alma paralela à parede b) caso do pilar com a alma perpendicular à parede	53
Gráfico 3.5 - Evolução das forças de restrição ao longo do tempo	54
Gráfico 3.6 - Deslocamento lateral a) alma paralela à parede b) alma perpendicular à parede	55
Gráfico 3.7 - Deslocamentos verticais dos pilares com a alma paralela, com a alma perpendicular à parede de alvenaria e isolado	56
Gráfico 4.1 - Evolução das forças de restrição no pilar isolado, obtidas por via numérica e experimental	70
Gráfico 4.2 - Evolução das forças de restrição no pilar com a alma paralela à parede, obtidas por via numérica e experimental	71
Gráfico 4.3 - Evolução das forças de restrição no pilar com a alma perpendicular, obtidas por via numérica e experimental.....	71
Gráfico 4.4 - Evolução das temperaturas nos pilares, obtidas por via numérica e experimental	71
Gráfico 4.5 - Evolução dos deslocamentos verticais no centro do pórtico, obtidos por via numérica e experimental.....	72
Gráfico 4.6 - Temperaturas na alma dos pilares para as simulações numéricas PAR-K13-LL30, PER-K13-LL30, ISOLADO-K13-LL30 e comparação com a curva, ISO 834	73

Gráfico 4.7 - Temperatura nas várias partes da secção transversal do pilar – caso NUM-PAR-K13-LL30.....	74
Gráfico 4.8 - Temperatura nas várias partes da secção transversal do pilar - caso NUM-PER-K13-LL30.....	74
Gráfico 4.9 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL30 ..	75
Gráfico 4.10 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL30	75
Gráfico 4.11 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL50	75
Gráfico 4.12 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL50	75
Gráfico 4.13 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL70	75
Gráfico 4.14 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL70	75
Gráfico 4.15 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL90	76
Gráfico 4.16 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL90	76
Gráfico 4.17 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL100	76
Gráfico 4.18 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL100	76
Gráfico 4.19 - Curva P/P0 ao longo do tempo sem paredes – Deformação sobre o eixo fraco	78
Gráfico 4.20 - Curva P/P0 ao longo do tempo com paredes - Casos com alma paralela à parede	78
Gráfico 4.21 - Curva P/P0 ao longo do tempo sem paredes – Deformação sobre o eixo forte	78
Gráfico 4.22 - Curva P/P0 ao longo do tempo com paredes - Casos com alma perpendicular à parede	78
Gráfico 4.23 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL30	79
Gráfico 4.24 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL30	79
Gráfico 4.25 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL50	80
Gráfico 4.26 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL50	80

Gráfico 4.27 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL70	80
Gráfico 4.28 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL70	80
Gráfico 4.29 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL90	81
Gráfico 4.30 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL90	81
Gráfico 4.31 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL100	81
Gráfico 4.32 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL100	81
Gráfico 4.33 - Deslocamentos laterais a meia altura – pilar isolado	83
Gráfico 4.34 - Deslocamentos laterais a meia altura - caso com a alma paralela à parede	83
Gráfico 4.35 - Deslocamentos laterais a meia altura - caso com a alma perpendicular à parede	84
Gráfico 4.36 - Comparação dos deslocamentos laterais a meia altura para as duas orientações do pilar em relação à parede de alvenaria e pilar isolado, simulação numérica e experimental	84
Gráfico 4.37 - Pormenor do gráfico anterior da comparação dos deslocamentos laterais a meia altura para as duas orientações do pilar e pilar isolado, simulação numérica e experimental	85
Gráfico 5.1 – Alongamento relativo do aço carbono em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2010)	88
Gráfico 5.2 - Calor específico do aço de carbono em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2010)	88
Gráfico 5.3 - Condutividade térmica do aço carbono em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2010)	88
Gráfico 5.4 - Relação de tensão-deformação para o aço de carbono, a temperaturas elevadas, EN 1993-1-2 (2010)	89
Gráfico 5.5 - Os fatores de redução para a relação de tensão-deformação do aço carbono a temperaturas elevadas, EN 1993-1-2 (2010)	89
Gráfico 5.6 - Representação do gradiente térmico a meia altura do pilar de aço para a simulação numérica a) perfil com a alma paralela à parede b) perfil com a alma perpendicular à parede	91

Gráfico 5.7 - Evolução das deformadas dos pilares ao longo do tempo a) alma paralela b)	
alma perpendicular	93

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

- **Abreviaturas**

SCI – Segurança Contra Incêndios

EN – Normas Europeias

EUA – Estados Unidos da América

MEF – Método dos Elementos Finitos

CAE – Computer Aided Engineering

d.C. – depois de Cristo

ISO – International Organization for Standardization

STC – SuperTempCalc

FEA – Finite Element Analysis

HKS – Hibbitt, Karlsson & Sorensen

LVDT – Linear Variable Differential Transformers

NBS – National Bureau of Standards

P-M – Diagramas de interação esforço axial – momentos fletores

BRE – Building Research Establishment

TRF – Transmissão do retorno à fonte

CEE – Comunidade Economica Europeia

i.e – Isto é

- **Simbologia**

F – Fator de forma

H – Fluxo de calor

P – Perímetro exposto ao fogo

P_{cr} – Carga crítica de Euler

λ – Índice de esbelteza

ϵ – Extensão

$\sigma(\theta)$ – Tensão

$\Delta\theta_a$ – Elevação de temperatura do aço em função do tempo t

c – Calor específico

ρ – Massa volúmica

h – Fluxo de calor

Δt – Intervalo de tempo

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Um dos fenómenos mais temidos pelo Homem é o incêndio, tanto pela sua imprevisibilidade, como pelas consequências que pode causar ao nível das perdas materiais e, mais gravoso ainda, as perdas de vidas humanas. Quando fora do controlo, o incêndio provoca danos incalculáveis. Têm-se, como exemplo dos seus efeitos, as consequências do acidente ocorrido a 11 de setembro de 2001, com o embate de dois aviões nas torres do *World Trade Center* em Nova York, o que levou à perda de milhares de vidas humanas e ao colapso de ambos os edifícios. Um caso bem mais recente, embora menos mediatizado, devido às consequências menos gravosas, mas com relevância para o estudo em causa, foi o incêndio ocorrido na Arena Pantanal a 25 de outubro de 2013, no Brasil, um dos estádios que recebeu o Campeonato do Mundo de Futebol, os relatórios técnicos demonstraram que os danos causados foram ao nível do betão superficial, não atingindo o aço da estrutura e portanto não comprometendo a estabilidade global da mesma, sofrendo, no entanto, várias intervenções de tratamento devido ao betão danificado.

O aço tem vindo a ganhar um grande destaque na construção, por apresentar várias vantagens em relação a outros materiais. Em comparação com o betão armado que representa grande parte das estruturas existentes, o aço apresenta vantagens como, melhor relação resistência/peso, melhor resistência ao sismo devido à sua maior ductilidade e menor peso, possibilitando uma construção mais rápida e precisa, é um material praticamente cem por cento reciclável. As fundações necessárias às estruturas metálicas são mais económicas devido ao seu menor peso e, por fim, permitem vencer maiores vãos que a estruturas de betão armado. Porém, a utilização do aço não traz apenas vantagens, pois é um material que apresenta elevada condutibilidade térmica, sofrendo perda de resistência com o aumento de temperatura.

O aço e os elementos estruturais de um edifício perdem resistência mecânica com o aumento da temperatura, provocado por uma situação de incêndio. Devido aos factos mencionados, nos últimos anos têm sido várias as normas e regulamentos relacionados com o dimensionamento e a proteção de estruturas em situação de incêndio, contemplando os materiais estruturais como o aço, o betão, a madeira, o alumínio e as suas ligas.

Com as diferentes normas e regulamentos de resistência ao fogo de estruturas, foi possível evoluir no uso de diversos tipos de materiais não comprometendo a segurança do edificado em situação de incêndio. Devido às diferentes aplicabilidades, em termos de materiais, permitem uma verificação dos diferentes elementos estruturais e ligações, relativamente às suas capacidades resistentes, quando sujeitos a elevadas temperaturas. Por outro lado, definem procedimentos que permitem a obtenção das características e espessura dos materiais de proteção que os elementos estruturais ou as ligações possam necessitar.

Desta forma, pretende-se evitar o colapso da estrutura por tempo suficiente de modo a possibilitar:

- A saída em segurança dos ocupantes do edifício;
- Operações de socorro;
- Combate ao incêndio de forma segura e eficiente;
- Minimização dos danos provocados nas estruturas ou edificações adjacentes.

No entanto, importa referir que a resistência ao fogo das estruturas de aço é baixa, pois o comportamento deste material nas condições de exposição ao incêndio provoca uma grande redução da sua tensão de cedência e do seu módulo de Young, o que dificulta na decisão da sua utilização na construção, por parte dos projetistas, pois quando comparado com a resistência ao fogo de materiais como o betão, ou mesmo a madeira, as perdas das propriedades mecânicas do aço com o aumento da temperatura, podem levar ao colapso precoce da estrutura, exemplo do *World Trade Center*.

Deve ainda mencionar-se o incêndio que deflagrou sobre a *Torre de Windsor* em Madrid (figura 1.1), no ano de 2005. A torre estava a sofrer intervenção com obras de remodelação (incluindo instalação de sistemas de proteção ao fogo) quando deflagrou o incêndio. Nessa data todos os andares inferiores ao 17º (excluindo o 9º e o 15º andar) já possuíam sistemas de proteção ao fogo acabando por resistir ao incêndio, ao contrário dos andares superiores ao 17º.



Figura 1.1 - *Torre de Windsor* (Madrid) [1]

De acordo com Usmani et al. (2001), vários investigadores concordam com o facto de as prescrições normativas fornecerem apenas aproximações para o cálculo da resistência ao fogo das estruturas, sendo elas conservadoras e nem sempre baseadas em princípios racionais, focando-se apenas em elementos isolados. Os autores descrevem como possível, construir uma mesma estrutura de uma edificação de forma mais económica, com pouca perda de resistência da estrutura global frente a uma situação de incêndio compartimentado, em vez de considerar apenas elementos isolados, por meio de uma grande redução da proteção contra incêndios nos elementos de aço.

Para explorar as consideráveis reservas da capacidade resistente das estruturas de aço em situação de incêndio, torna-se necessário ter em conta as inúmeras variáveis intervenientes. Em primeiro lugar, devem conhecer-se com rigor as diferentes formas de transferência de calor (condução, convecção e radiação) e de que forma o aumento de temperatura vai alterar as propriedades mecânicas do material. A curva de incêndio, o tipo de elemento estrutural, as condições de apoio, a presença de outro tipo de material adjacente ao mesmo, são fatores importantes que, entre outros, influenciam o comportamento dos elementos de aço quando sujeitos a altas temperaturas.

A avaliação das temperaturas na secção de um elemento estrutural pode ser calculada com base em métodos analíticos simplificados, fornecidos pelo Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), através de ensaios experimentais ou numéricos. Importa referir que são grandes as diferenças de valores obtidos entre os métodos.

Os métodos simplificados constantes na norma através de expressões e valores tabelados, embora possam assegurar a segurança do elemento estrutural, provocam um aumento económico da edificação, para além de não contemplarem a evolução não uniforme da temperatura na secção transversal do elemento, desprezando as condições de fronteira.

Atualmente os meios computacionais disponíveis permitem que sejam feitos estudos numéricos, com características de estrutura real, recorrendo a elementos finitos, bastante fidedignos e, portanto, revelam-se uma ferramenta cada vez mais útil e importante nesta área de investigação.

As comparações existentes entre o método dos elementos finitos e os métodos simplificados, aplicados a elementos estruturais, parcialmente expostos à ação do fogo, ou a elementos que estão em contacto com outros materiais de diferentes propriedades térmicas, podem apresentar resultados significativamente diferentes, sendo que se consideram mais fiáveis os resultados obtidos através de métodos numéricos.

Os métodos numéricos revelam-se igualmente uma boa alternativa aos ensaios experimentais, quando a calibração dos modelos é feita de forma adequada. Na presente dissertação irá ser utilizado o programa de elementos finitos ABAQUS, para a modelação numérica dos ensaios, bem como, para a realização de um estudo paramétrico.

Os ensaios experimentais são normalmente os que conduzem a resultados mais próximos da realidade. A realização destes ensaios torna-se por vezes difícil devido aos custos inerentes a eles associados, como os materiais, a mão-de-obra e a necessidade de dispor de equipamentos

tecnológicos de alta precisão, sendo este processo difícil para elementos estruturais isolados e praticamente impossível para ensaios à escala de uma estrutura global.

Os ensaios experimentais têm um papel fundamental neste tipo de investigação científica, fornecendo parâmetros necessários para a validação e construção de modelos numéricos, tornando assim, viável o estudo de uma estrutura global.

1.2. Objetivos da Pesquisa

O presente estudo é dedicado à avaliação do comportamento global de um pilar em situação de incêndio, pois este, está fortemente dependente das suas condições de fronteira, por estar em contacto com paredes, vigas e lajes do edifício. A análise isolada do comportamento do pilar, isto é, não considerando a estrutura circundante, é bastante diferente da análise de um pilar inserido em paredes e num pórtico de uma estrutura, portanto, muito menos realista. Assim, parâmetros como a rigidez axial e rotacional da estrutura circundante, a esbelteza do perfil de aço, o nível de carregamento aplicado e a excentricidade do mesmo têm uma forte influência no comportamento global destes elementos estruturais, quando sujeitos a elevadas temperaturas.

No entanto, situação recorrente e ainda pouco estudada, embora com influência nos pilares de aço, é o comportamento dos mesmos quando inseridos em paredes. Na sequência deste tema, Correia (2012a) na sua tese de doutoramento realizou estudos sobre a influência das paredes de alvenaria no comportamento dos pilares de aço quando sujeitos à ação do fogo.

Este estudo pretende dar continuidade à análise sobre o comportamento dos pilares quando inseridos em paredes de alvenaria e aprofundá-lo. Tendo como principal objetivo avaliar, através de um estudo paramétrico, a influência das paredes no comportamento estrutural de um pilar de aço inserido num edifício, sujeito à ação do incêndio. A maioria dos estudos realizados sobre este tema, demonstraram que as paredes têm um efeito favorável. Contudo, interessa descobrir se nalgum caso esse efeito será desfavorável.

A metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos foi a seguinte:

- Realização de ensaios experimentais em pilares de aço HEA 100, fazendo variar a orientação da sua secção, em relação à parede de alvenaria, para se poder avaliar a distribuição das temperaturas e as forças de restrição geradas nos pilares.
- Simular os ensaios experimentais através do programa de elementos finitos, ABAQUS, por forma a obter modelos numéricos em que se possam identificar a influência do nível de carregamento na resistência ao fogo dos pilares e o deslocamento do seu centro de gravidade devido à variação da temperatura.
- Validação dos modelos numéricos para posterior utilização em estudos futuros.
- Comparação dos valores dos parâmetros estudados pela via experimental e numérica.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada em sete capítulos.

No presente capítulo, realiza-se uma breve descrição do trabalho proposto, bem como a problemática e os desafios do estudo dos pilares de aço quando sujeitos a elevadas temperaturas, com gradientes térmicos na secção transversal. Descrevem-se também os objetivos da investigação efetuada.

No Capítulo 2, Estado da Arte, são apresentados estudos e artigos já publicados sobre o comportamento de pilares quando sujeitos a gradientes térmicos na secção transversal, provocados pela ação do fogo e por um isolamento parcial.

No Capítulo 3, Ensaaios Experimentais, são descritos todos os processos envolvidos no trabalho experimental, para se concluir os mesmos com sucesso.

O Capítulo 4, Modelação Numérica, apresenta uma descrição do *software* de modelação e cálculo utilizado nas simulações numéricas, o programa ABAQUS. Este capítulo permite a visualização dos modelos numéricos utilizados e as opções tomadas são apresentadas e justificadas.

No Capítulo 5, Estudo analítico do fenómeno de “*Thermal Bowing*”, onde se analisa a evolução das propriedades mecânicas do material, a evolução das características geométricas da secção e onde se podem observar as configurações de deformada.

No Capítulo 6, Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros, confrontam-se os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais e numéricos, assim como, se apresentam conclusões decorrentes desses mesmos resultados. Desenvolvimento de trabalhos futuros serão também aqui apresentados.

Referências Bibliográficas, contemplando as referências analisadas.

Anexos, onde são apresentados, cálculos, fotografias dos ensaios e imagens das simulações numéricas.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Considerações Gerais

O presente capítulo resume a pesquisa bibliográfica realizada, descrevendo artigos, normas e relatórios associados ao tema da dissertação, promovendo o desenvolvimento do mesmo.

Desse modo, apresenta-se uma breve introdução sobre os acidentes que envolveram incêndio e sobre o início do estudo do cálculo de estruturas sujeitas à ação do fogo, mencionando-se as principais conclusões de vários autores, em relação a trabalhos de natureza numérica e experimental.

2.1.2 Acidentes que envolveram incêndio

Os acidentes que envolvem incêndio foram documentados desde a era cristã, exemplo disso, o Grande Incêndio de Roma, desastre ocorrido no ano 64 d.C, no núcleo comercial da antiga cidade de Roma. Tendo em consideração que naquela época os edifícios já alcançavam os cinco pisos, acima do nível de referência (cota do pavimento), e eram construídos basicamente de madeira, favoreceu a rápida propagação das chamas.

Deve ser igualmente citado o incêndio ocorrido na cidade de Londres, Inglaterra, datado de 1666, considerado uma das maiores catástrofes da capital inglesa, (Kimura, 2009). Grande parte da cidade ficou destruída, esse acontecimento tornou-se o passo inicial para que se impusessem as primeiras exigências de segurança contra a propagação de incêndios na construção.

No século XIX, a cidade de Chicago nos EUA exibia edifícios na generalidade com seis pisos acima do plano de referência (cota do pavimento), basicamente construídos em madeira, à semelhança da antiga cidade de Roma, foi completamente devastada por um incêndio.

No Brasil, de acordo com a literatura, existem relatos datados de 1972, onde se identifica a ocorrência de um incêndio no Edifício Andraus, figura 2.1, apontando-se como causa do mesmo a inexistência de meios de segurança e combate a incêndios como, *sprinklers* automáticos, alarme de detecção automática, falta de proteção dos elementos de construção, entre outros.



Figura 2.1 - Incêndio no Edifício Andraus, Brasil [2]

O estudo de estruturas sujeitas ao fogo é um tema com uma elevada quantidade de aspetos por conhecer e desenvolver, necessitando de trabalho de investigação. Segundo Babrauskas e Willianson os primeiros ensaios de resistência ao fogo são datados de 1790.

No entanto, só na década de 1880, na Alemanha, e em 1890, nos EUA e na Inglaterra, se começaram a realizar alguns ensaios em laboratório, já com o reconhecimento pela qualidade com que se executavam, mas também pelo número até então realizado, dando a partir daí origem aos primeiros procedimentos normalizados, no início de 1900.

A recolha de dados relativos aos acidentes provocados por incêndios permitiu que posteriormente fossem feitas as primeiras publicações sobre o que não funciona na proteção contra incêndios. Esses dados foram utilizados pela primeira vez em 1890, para uma avaliação do desempenho dos diferentes componentes dos edifícios quando sujeitos à ação do fogo.

Com a notória necessidade que se fazia sentir no que respeitava ao desenvolvimento de testes e métodos de resistência ao fogo dos elementos estruturais, foram inicialmente ensaiados pilares e lajes, tendo sido gradualmente incluídas parede, portas e outras componentes.

Bauschinger, em 1884, foi o pioneiro dos ensaios com pilares. Desenvolveu procedimentos de ensaio a partir de colunas de ferro forjado, de pedra, de tijolo e de betão, tendo por base uma técnica inovadora que consistia na medição da temperatura da superfície dos pilares, em vez da temperatura no forno. Bauschinger submetia os pilares a vários ciclos de aquecimento (através de um forno a lenha) e arrefecimento (através de água) ao mesmo tempo em que lhes aplicava uma carga e efetuava medições das deformadas daí decorrentes.

Muller and Luhmann (1887) conduziram uma série de experiências, tendo por base apenas um ciclo de aquecimento e arrefecimento dos pilares de aço (protegidos e não protegidos), contrariamente a Bauschinger, nas quais eram registados os tempos em que os perfis atingiam o seu “ponto de fusão” (apresentavam cor avermelhada), para assim se cruzarem resultados entre os pilares de aço protegidos e não protegidos. As diferenças registadas entre ambos foram pouco significativas, resistindo igualmente cerca de trinta minutos.

Em Viena 1893, após o desenvolvimento de um novo forno, foram testados pilares de aço protegidos por alvenaria de tijolo, chegando a resultados de resistência ao fogo de aproximadamente duas horas e meia.

Através do desenvolvimento técnico e teórico nesta área de investigação, de acordo com a literatura, foram surgindo um pouco por todo o mundo novos ensaios. Em Hamburgo (1894), os pilares passavam a sofrer carregamento exercido por macacos hidráulicos, o carregamento e as temperaturas do forno eram aplicados de forma monitorizada.

Nos Estados Unidos da América (EUA) em 1896, foi desenvolvido um forno a gás e levados a cabo os primeiros ensaios, ainda sem grande relevância. Entre 1917 e 1920, em Chicago, realizaram-se os primeiros ensaios já normalizados; desenvolvidos por algumas das principais entidades, destacando-se *National Bureau of Standards (NBS)*, em Washington. O seu principal colaborador, Simon Ingberg veio a tornar-se, mais tarde, na autoridade americana ao nível dos ensaios ao fogo, efetuando mais de cem ensaios a pilares de aço, betão armado, ferro fundido e madeira, com o objetivo de serem estudados os comportamentos dos vários materiais.

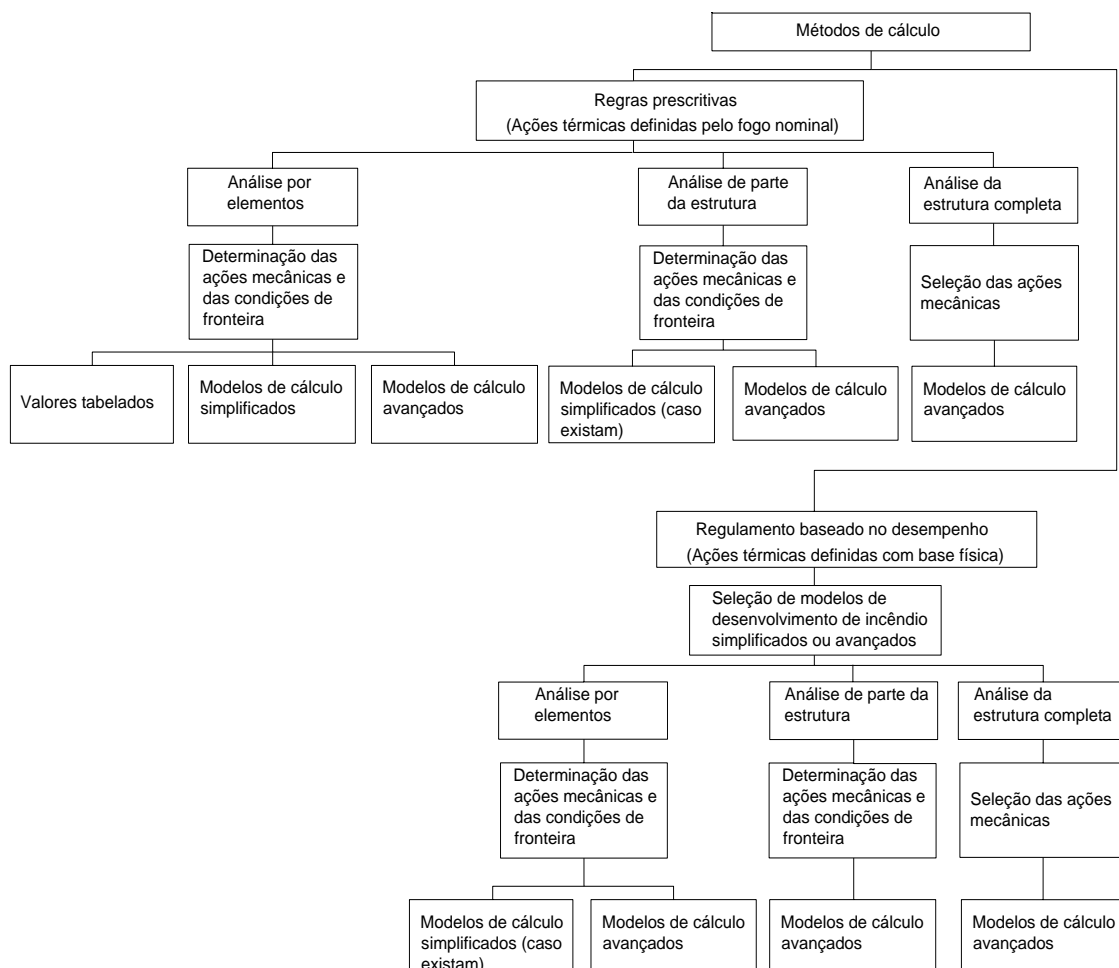
Os ensaios supramencionados foram os primeiros realizados em grande escala nos EUA, basearam-se no controlo do forno e subsequentes resultados, sendo utilizados durante anos na formulação de normas.

Nos subcapítulos seguintes apresenta-se a descrição destes dois métodos supramencionados.

2.2. Métodos Simplificados

Os métodos de cálculo simplificados estão diretamente relacionados com o objetivo de unificar critérios e normas de cálculo no dimensionamento de estruturas, encontrando-se divididos nos diferentes tipos de projeto. As partes respeitantes ao estudo em causa são definidas pelo Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), referentes ao cálculo da capacidade resistente de elementos estruturais sujeitos à ação do fogo, quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Quadro de dimensionamento, (EN 1993-1-2:2010)



Os eurocódigos são um conjunto de Normas Europeias que têm como objetivo a regulamentação de técnicas, processos e produtos de construção, relativos especialmente a projetos de estruturas, ultrapassando barreiras técnicas, até então existentes, à comercialização no Espaço Europeu.

O método de dimensionamento constante no Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) é totalmente analítico, apresentando algumas limitações, devido à elevada complexidade no cálculo do comportamento global de uma estrutura ou das ações atuantes quando a mesma está sujeita à ação do fogo. Portanto, são notórias as limitações da sua aplicabilidade até pelas diversas simplificações que têm de ser utilizadas.

O facto mencionado anteriormente pode ser observado no Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), no caso em que apenas são considerados elementos isolados no cálculo da resistência ao fogo, desprezando a estrutura circundante e tendo somente em conta o aumento uniforme da temperatura em toda a secção.

A última simplificação referida está diretamente relacionada com o fator de forma.

O aço, sendo um material com elevada condutividade térmica, aquece rapidamente quando sujeito ao aumento de temperatura. No entanto, existem secções que aquecem mais rapidamente do que outras muito devido às suas dimensões. Por tal facto, no dimensionamento ao fogo, existe um fator a ter em consideração, fator de forma ou de massividade, calculado para elementos não protegidos com base na relação entre a área exposta da secção por unidade de comprimento e o volume por unidade de comprimento, de acordo com a equação 2.1.

$$\frac{A_m}{V} (m^{-1}) \quad (2.1)$$

Onde:

A_m – Área exposta por unidade de comprimento [m^2/m]

V – Volume por unidade de comprimento [m^3/m]

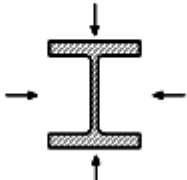
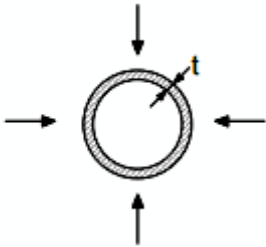
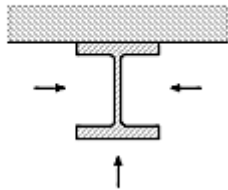
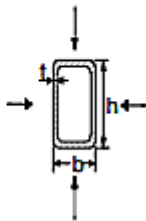
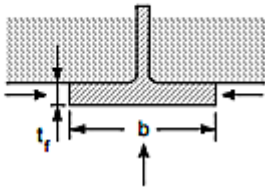
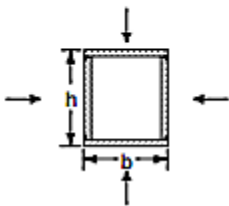
Para barras prismáticas, o fator de forma ou de massividade resulta na relação entre o perímetro exposto ao fogo, P e a área da secção reta do elemento, A , de acordo com a expressão descrita por Vila Real (2003):

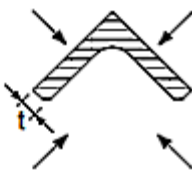
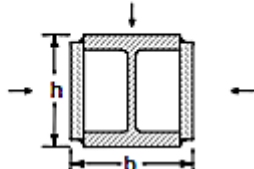
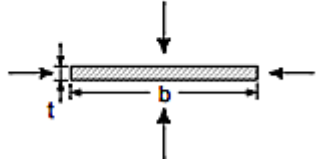
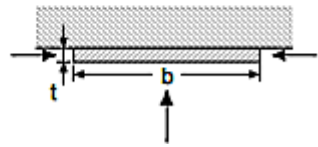
$$\frac{A_m}{V} = \frac{P \times L}{A \times L} = \frac{P}{A} (m^{-1}) \quad (2.2)$$

Em que L é um dado comprimento do elemento.

O Eurocódigo 3 – parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) e a norma NBR 14323:1999, fornecem um quadro (quadro 2.2) para o cálculo do fator de forma ou de massividade, em diferentes secções, para várias situações, não cobrindo, contudo, todas as situações possíveis de elementos estruturais parcialmente expostos à ação do fogo.

Quadro 2.2 - Fator de massividade (A_m/V) para elementos de aço não protegidos, Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010)

<p>Secção aberta exposta ao fogo em todos os lados:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p>Tubo exposto ao fogo em todos os lados:</p> $A_m/V = l/t$ 
<p>Secção aberta exposta ao fogo em três lados:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{superfície exposta ao fogo}}{\text{área da secção transversal}}$ 	<p>Secção tubular (ou secção em caixão soldada, de espessura uniforme) exposta ao fogo em todos os lados:</p> <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p>Banzo de secção em I, exposta ao fogo em três lados:</p> $A_m/V = (b + 2t_f)/(bt_f)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t_f$</p> 	<p>Secção em caixão soldada, exposta ao fogo em todos os lados:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{área da secção transversal}}$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p>Cantoneira exposta ao fogo em todos os lados:</p>	<p>Secção I com reforço em caixão, exposta ao fogo em todos os lados:</p>

$A_m/V = 2/t$ 	$A_m/V = \frac{2(b+h)}{\text{área da secção transversal}}$ 
<p>Barra plana exposta ao fogo em todos os lados:</p> $A_m/V = 2(b+t)/(bt)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 2/t$</p> 	<p>Barra plana exposta ao fogo em três lados:</p> $A_m/V = (b+2t)/(bt)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 

2.3. Métodos Avançados

Os métodos avançados são um recurso utilizado em detrimento dos métodos experimentais, dado o custo elevado que a generalidade dos últimos apresentam. Esse custo por vezes não é passível de ser suportado, ou então não é justificado o seu investimento, sendo que para os métodos experimentais, normalmente só são analisados elementos isolados, tornando-se proibitivo o estudo do comportamento global de uma estrutura.

A utilização dos métodos avançados de cálculo, confere vantagens em relação aos métodos experimentais, tais como:

- efetuar uma análise sobre o comportamento de uma estrutura global em caso de incêndio (não estando limitada a análise de elementos isolados);
- possibilitar o estudo de um número infinito de materiais, os mais variados tipos de secções ou estruturas e até diferentes situações de carregamento e cenários de incêndio;
- permitir uma análise térmica, avaliando o comportamento mecânico do elemento, ou então, uma análise acoplada térmica e estrutural em simultâneo.

A complexidade associada a este tipo de métodos, exige da parte do projetista um elevado grau de conhecimento e experiência, de forma a calibrar o modelo o mais próximo possível de uma situação real, tornando-se por vezes necessário, recorrer a resultados experimentais para se avaliar os modelos numéricos. Com a evolução do mercado computacional e da investigação com base em métodos numéricos (métodos de elementos finitos – MEF), são já vários os

programas disponíveis no mercado para fazer face às necessidades dos métodos de cálculo avançado. Programas comerciais tais como, o ABAQUS, o ANSYS e o DIANA FEA satisfazem essas necessidades, embora a sua aquisição envolva um avultado investimento inicial.

O ABAQUS, programa utilizado nesta dissertação, na modelação numérica, foi lançado originalmente no mercado em 1978, desenvolvido pela *HKS Inc de Rhode Island*, EUA e comercializado pela SIMULIA. É um software de análise de elementos finitos, com vasta aplicação ao nível da engenharia das estruturas, principalmente quando sujeitas a eventos extremos (caso do fogo).

O *software* é composto por duas partes:

- gráfica (ABAQUS/CAE e ABAQUS/Viewer);
- *solver* (ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit).

O ABAQUS/CAE é pré e pós processador. Como pré-processador gera o arquivo de entrada de dados que contém a geometria, propriedades do material, condições de contorno, carregamento aplicado e a malha de elementos finitos definida pelo usuário. O programa, permite ainda, que o arquivo de entrada de dados seja alterado manualmente pelo utilizador. Como pós – processador o ABAQUS/CAE possibilita a visualização gráfica dos resultados. O ABAQUS/Viewer funciona exclusivamente como pós – processador. O ABAQUS/Standard e o ABAQUS/Explicit simulam, computacionalmente, carregamentos estáticos e dinâmicos, respetivamente, sendo que o primeiro utiliza um esquema de integração implícito enquanto que o segundo recorre a um esquema de integração explícito, para resolução de sistemas não - lineares.

ANSYS, programa semelhante ao ABAQUS, desenvolvido nos EUA, nos anos 70 por John Swanson, permite desenvolver uma análise termo – mecânica dos mais variados tipos de elementos, bidimensional ou tridimensional, permitindo ainda outras análises como, estáticas ou dinâmicas, entre outras.

No caso do programa DIANA FEA, vocacionado para a análise de especialidades da Engenharia Civil, permite a resolução de problemas convencionais da engenharia, exigindo uma modelação avançada e comportando a funcionalidade de análise. Inclui, análises de grandes estruturas, tais como, barragens, comportamento complexo do material não-linear, tensões induzidas a partir de condições de carregamento extremas (incêndios, explosões, etc), modelos complexos onde a estrutura interage com o solo e/ou fluídos.

O DIANA FEA com a sua extensa biblioteca de modelos, materiais e capacidade de análise, oferece soluções para diferentes tipos de análises, num conjunto capaz de resolver os mais diversos problemas da engenharia. Criado pela empresa Holandesa TNO DIANA (A TNO COMPANY).

Importa referir outros programas disponíveis para o cálculo de estruturas em situação de incêndio, tais como o FEAST, o SAFIR, o SUPERTEMPCALC, o VULCAN, entre outros, apresentando uma relação custo-benefício inferior aos anteriormente descritos e limitações em relação ao tipo de elementos finitos disponíveis.

2.4. Estudos Numéricos e Experimentais

Em situação de incêndio em edifícios, o fogo pode estar presente apenas de um só lado dos elementos estruturais, devido às compartimentações existentes, à presença de elementos de separação como é o caso das paredes que são um fator essencial no impedimento da deflagração simultânea do incêndio em ambos os lados do elemento. Nos edifícios comuns, o habitual é que os pilares estejam inseridos em paredes, situação que os leva a uma distribuição não uniforme de temperaturas, causando fenómenos como “*Thermal Bowing*”.

2.4.1 Estudos Numéricos

No presente subcapítulo descrevem-se estudos numéricos efetuados no âmbito da resistência ao fogo de elementos estruturais de um edifício em estrutura metálica.

Usmani et al. (2001), descreveram teoricamente o comportamento das estruturas sob a ação das temperaturas uniformes e diferenciais. Esse estudo baseou-se na análise de elementos estruturais individuais, nos quais os apoios considerados tinham em conta a presença de uma estrutura circundante, sob diferentes ações térmicas, descrevendo assim o comportamento dos elementos. Todas as expressões analíticas desenvolvidas nesta publicação partiram da relação fundamental da mecânica estrutural que descreve o comportamento de estruturas quando sujeitas a ações térmicas (equação 2.3).

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{thermal} + \epsilon_{mechanical} \quad (2.3)$$

Onde:

$\epsilon_{thermal}$ – Extensão térmica devida ao aquecimento [mm/m]

$\epsilon_{mechanical}$ – Extensão mecânica devida ao aquecimento [mm/m]

As abordagens descritas e usadas atualmente para a análise deste tipo de estruturas, são excessivamente conservadoras e nem sempre têm por base princípios fundamentais, conduzindo a construções pouco económicas, não sendo justificáveis, por fazerem uso excessivo da proteção de elementos. Este documento faculta elementos fundamentais, por forma a estimar forças e deslocamentos em estruturas reais com idealizações apropriadas, possibilitando análises numéricas com resultados precisos, levando assim, a construções mais económicas.

Para possibilitar um estudo desenvolvido da problemática em questão, Landesmann e Baptista (2005) desenvolveram um novo modelo numérico de aplicação em métodos avançados, para avaliação de estruturas porticadas em aço sob a ação do fogo, figura 2.2.

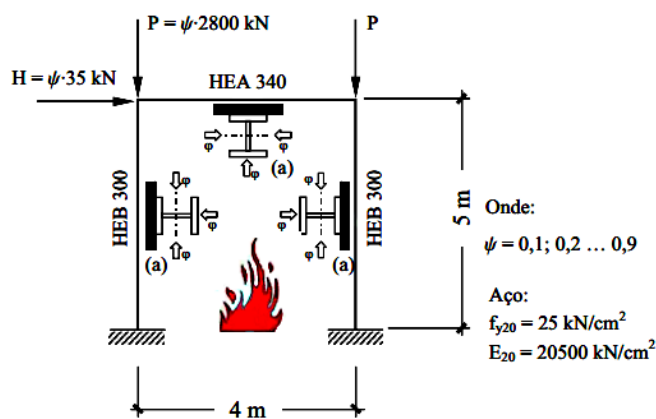


Figura 2.2 - Esquema da estrutura analisada e posicionamento da ação térmica, (Landesmann e Baptista (2005))

No desenvolvimento do trabalho, recorreram a um modelo de rótulas plásticas para a determinação da resistência da estrutura.

A abordagem numérica baseou-se no desenvolvimento de características, como a diminuição da rigidez nos nós dos elementos, a diminuição da resistência e da rigidez dos pilares de aço de acordo com as normas europeias e numa nova formulação dos deslocamentos obtidos. Utilizaram para curva de incêndio, a curva padrão, ISO 834 e assumiram como uniforme as temperaturas ao longo da secção longitudinal.

Os resultados obtidos, foram posteriormente comparados com os métodos simplificados do Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) e com a simulação numérica efetuada no programa de elementos finitos SAFIR. Os autores concluíram que os resultados eram satisfatórios uma vez que foram consideradas algumas simplificações no modelo numérico.

Após a avaliação da variação da temperatura nos perfis de aço, através de métodos simplificados, a norma brasileira, NBR 14323:1999 e o Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), indicaram a equação 2.4 para o seu cálculo, onde se levantaram algumas dúvidas sobre a utilização do fator forma.

$$\Delta\theta_a = \frac{F}{c \rho} \dot{h} \Delta t \quad (2.4)$$

Onde:

$\Delta\theta_a$ – Elevação de temperatura do aço em função do tempo t (°C)

F – Fator de forma = $\frac{A_m}{V}$ (m^{-1})

c – Calor específico do aço (J/kgK)

ρ – Massa específica do aço (kg/m^3)

\dot{h} – Valor de cálculo do fluxo de calor efetivo por unidade de área (W/m^2)

Δt – Intervalo de tempo (s)

Este fator resulta do quociente entre o perímetro da secção exposta ao fogo e a área da secção que está a ser aquecida, até ser atingida a temperatura crítica. Pois, quanto maior for o perímetro exposto, mais rápido será o aquecimento da secção e por sua vez, quanto maior a área da secção mais tempo levará o aquecimento da mesma.

Valdir Pignatta e Silva (2006), analisou algumas das situações presentes no quadro 2.2, sobre a evolução da temperatura dos elementos tendo em conta o fator de massividade, focando-se nas situações que refletem a maioria dos casos verificados em edifícios, como se pode visualizar na figura seguinte:

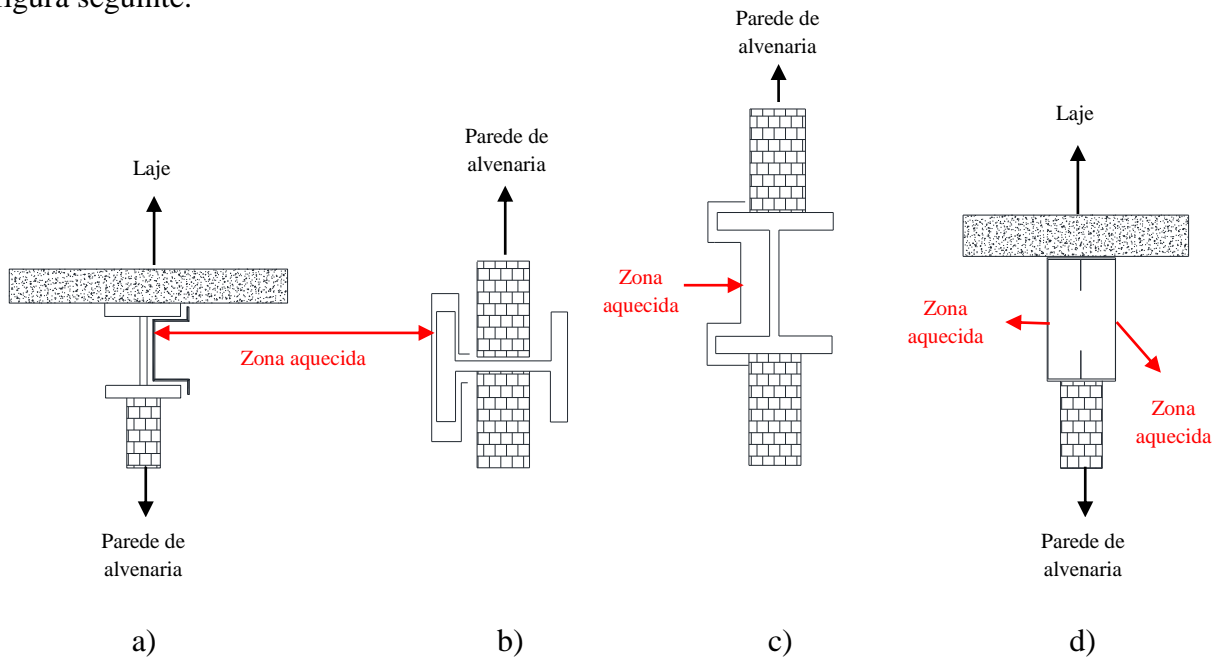


Figura 2.3 - Casos de estudo analisados por Silva (2006) a) viga de aço em contacto com laje e com a parede b) pilar em contacto com a parede (alma perpendicular) c) pilar em contacto com a parede (alma paralela) d) secção fechada de viga em contacto com a laje e a parede

O autor utilizou o programa SuperTempCalc, para elaboração dos modelos numéricos. Concluiu que para uma secção em que a exposição é em três faces, a equação 2.4 conduz a resultados seguros, funcionando o elemento que está em contacto com o perfil de aço como material isolante. Para outras situações frequentemente presentes nos edifícios, existe alguma dificuldade na definição da área a considerar para o cálculo do fator F (fator de forma). O autor efetuou o cálculo do mesmo e da evolução das temperaturas através do indicado no Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) e, na norma NBR 14323:1999, comparou com o método avançado do SuperTempCalc, verificando que a expressão não conduz a resultados satisfatórios.

Atendendo a que a expressão 2.4 apresenta algumas limitações no cálculo da evolução das temperaturas para elementos de aço, em que só uma das faces se encontra exposta ao fogo, existiu a necessidade de efetuar uma análise térmica recorrendo, por exemplo, a métodos avançados, dada a dificuldade de cálculo do fator de forma, na definição da área aquecida.

Garlock et al. (2006), apresentaram um estudo sobre o efeito combinado do esforço axial e dos momentos fletores em vigas – coluna expostas ao fogo, com gradientes térmicos, onde fizeram a comparação do comportamento destes elementos com os que apresentam perfis de temperatura uniforme. Os modelos de colunas utilizadas no estudo foram secções de aço com banzos de grande espessura, que pertenciam a edifícios de elevada altura. Foram considerados os efeitos de vários parâmetros como a espessura da chapa de fixação (do topo e da base), a altura da secção transversal e a direcção de flexão (i.e com flexão em torno do eixo forte e do eixo fraco). Através dos resultados apresentados, os autores verificaram que os elementos que experimentavam aquecimento diferencial, tais como, colunas periféricas ou vigas que suportavam uma laje, desenvolviam um gradiente térmico através da sua secção. Constataram que se as temperaturas fossem suficientemente elevadas para reduzir a tensão de cedência do aço, o gradiente térmico fazia com que a posição do ponto de aplicação do esforço axial resultante se desloca-se e com isso induzia momentos fletores adicionais que alteravam o desenvolvimento dos diagramas de interação P-M. Dependendo da combinação de carregamento aplicada, o desenvolvimento dos diagramas de interação P-M era calculado com base numa temperatura uniforme ao longo da secção, podendo fornecer uma estimativa conservativa ou insegura da capacidade real da secção que deverá ser estimada considerando o gradiente real de temperatura na secção. Essas conclusões foram traduzidas nos gráficos da figura 2.4.

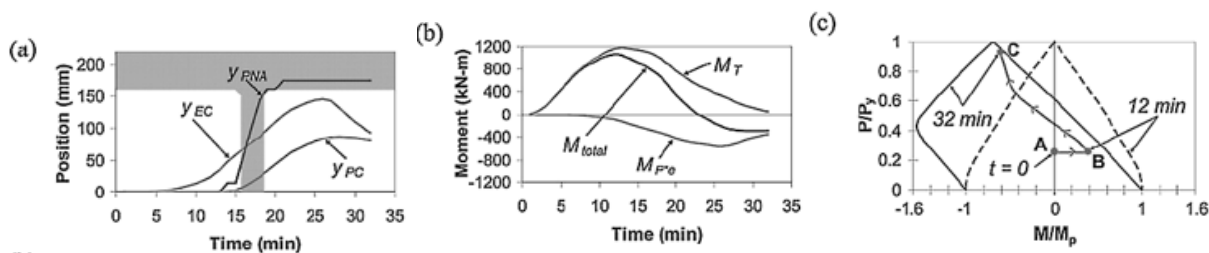


Figura 2.4 - A figura (a) a localização do centro de gravidade, (b) componentes do momento, e (c) o desempenho P-M normalizado para uma coluna W14 × 314 submetida ao fogo em três lados e aplicada $P = 25\%$ da inicial P_y , (Garlock et al. (2006))

Desse modo, Tan et al. (2007), realizaram um estudo com o intuito de encontrar uma solução em que não houvesse a necessidade de recorrer a métodos avançados de cálculo para determinar a estabilidade de um pilar quando sujeito à ação do fogo.

Esse estudo consistiu na análise e comparação de dois modelos distintos, em que no primeiro modelo a distribuição de temperaturas é linear ao longo do perfil longitudinal e no segundo, a distribuição uniforme das temperaturas ocorre ao longo da sua altura. Ao nível mecânico, foram idealizadas em ambos os pilares duas molas elásticas nas suas extremidades, por forma a simular as restrições axiais produzidas pela estrutura adjacente. Com a análise das soluções analíticas e a comparação das mesmas com os resultados numéricos, obtiveram uma aceitável correlação entre ambas. Os autores puderam concluir que as restrições térmicas afetam significativamente a carga de encurvadura dos pilares, quanto maior for a altura dos perfis, maiores as diferenças de temperatura entre as extremidades dos mesmos.

Garlock et al. (2008), publicaram um documento baseado numa metodologia de forma - fechada que pode ser utilizada para prever o aumento da procura experimental pelas colunas periféricas, que fazem parte de um edifício em estrutura metálica exposta ao fogo. O estudo baseia-se no subconjunto que inclui um comprimento de dois andares da coluna periférica e a viga referente a um dos andares, na direção perpendicular ao exterior do edifício. Quando aquecida, a viga expande e induz o momento de flexão que provoca deflexão lateral no pilar, bem como o aumento da força axial na própria viga. A abordagem proposta tem duas componentes principais: (1) um modelo de material que se aproxima da não linearidade e considera os efeitos da temperatura, e (2) um modelo mecânico que representa a coluna periférica em interação com a viga. Estes modelos são utilizados para desenvolver uma solução de forma fechada - simplificada, estimando a força axial exercida na viga e o momento de flexão exercido no perfil periférico que pode ser utilizado como parte de um diagrama com base no desempenho do perfil quando exposto ao fogo. As soluções dos modelos simplificados são depois comparadas com os resultados de um complexo e detalhado protótipo de vários andares, modelo de análise de elementos finitos. A comparação destes resultados mostra que o modelo simplificado confere boas estimativas do comportamento estrutural.

Para o cálculo de elementos viga – pilar, sujeitos a carga axial (P) e momentos (M), sob a ação do fogo é prática corrente que seja considerada uma distribuição uniforme de temperaturas na secção, Garlock et al. (2008), consideram este método eficaz apenas para determinadas situações, pois em casos em que o aquecimento do elemento não é uniforme, desenvolvendo por isso um gradiente térmico na secção, o método já não é aplicável. Os autores analisaram os efeitos dos gradientes térmicos, comparando elementos sob temperaturas uniformes e não uniformes, avaliando os efeitos de espessura dos banzos, altura da secção e eixo forte e fraco de flexão (figura 2.5).

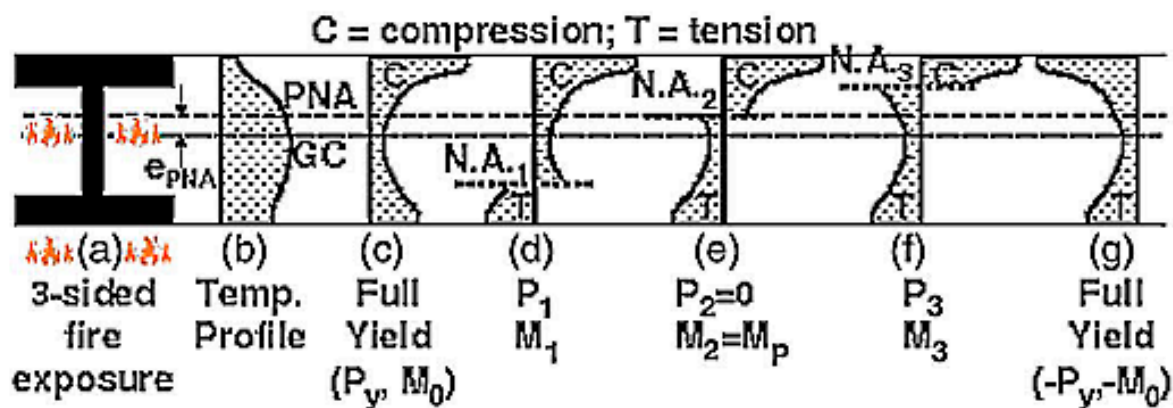


Figura 2.5 - Perfis de temperatura e tensões de cedência com a posição do eixo neutro em diferentes locais, (Garlock et al., 2008)

Concluíram que para elevadas temperaturas o gradiente térmico provoca o deslocamento da posição da força axial resultante, induzindo momentos de flexão adicionais, alterando assim, a capacidade resistente da secção. Determinaram que os resultados conservativos ou não conservativos no cálculo baseado na temperatura uniforme dependem das forças atuantes P-M.

Quiel e Garlock (2008), têm ao longo dos últimos anos dedicado atenção à influência da estrutura circundante no elemento de aço isolado (pilar), realizaram trabalhos de pesquisa nos

quais apresentam uma metodologia que permite prever o comportamento de pilares de edifícios quando expostos ao fogo (figura 2.6).

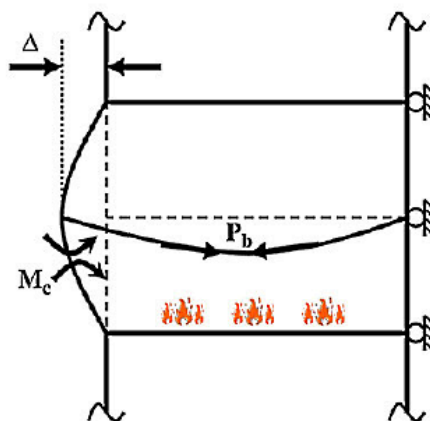


Figura 2.6 - Momentos fletores no pilar, esforços axiais na viga e deslocamento lateral no pilar – induzidos pela ação do incêndio, (Garlock et al., 2008)

O estudo centra-se no facto do pilar ser parte integrante da estrutura e estar parcialmente exposto à ação do fogo, situação que origina um aquecimento diferencial que por sua vez induz esforços de flexão, assim como provoca o aumento do esforço axial a que está sujeita a viga e a deflexão lateral do pilar. São essencialmente considerados dois aspetos principais: o material da secção cujo perímetro está a ser aquecido sofrer alterações das suas características mecânicas, tal como recomendado pelo Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) devido ao aumento da temperatura, bem como um segundo aspeto que se prende com a caracterização do modelo no qual é representada a interação entre o pilar e a viga da estrutura.

Com o intuito de prever o comportamento do pilar devido à expansão térmica da viga e à sua exposição parcial à ação do fogo, permitindo desse modo avaliar de que forma é que os esforços atuantes eram transmitidos ao pilar (momento fletor e esforço axial) influenciavam a capacidade resistente da secção, encurvadura local e lateral, podendo estes dados simplificados serem bastante úteis para o estudo de situações mais complexas.

Érica Kimura (2009b), no âmbito da sua dissertação de mestrado, realizou um largo número de simulações numéricas em pilares de aço submetidos à ação do fogo, em condições de compartimentação, proporcionadas por paredes de alvenaria ou lajes de betão. Com recurso ao *software* de cálculo ANSYS v9.0 e visando a análise do gradiente térmico nos elementos estruturais, esses ensaios foram posteriormente transferidos para modelos tridimensionais, obtendo-se o campo de temperaturas nos elementos. Seguidamente, a autora realizou uma análise termo-estrutural considerando as não linearidades geométricas do material. Nesse trabalho, foram ainda propostas novas fórmulas de cálculo para o fator de massividade, F (figura 2.7), pois tanto as normas brasileiras como as europeias não contemplam todos os casos possíveis, conduzindo a valores de temperaturas diferentes dos verificados nas situações abordadas.

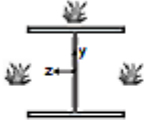
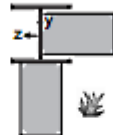
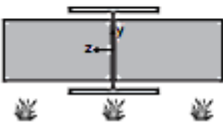
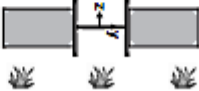
Configuração	Fator de massividade	Configuração	Fator de massividade
	$\frac{2 \cdot (2 \cdot b_f + d - t_w)}{A_g}$		$\frac{2 \cdot b_f + 2t_f + h - 2e_{aext} - t_w}{2 \cdot A_g}$
	$\frac{2 \cdot b_f + d - t_w - e_{aext}}{A_g}$		$\frac{d + 2 \cdot b_f - t_w - e_{aext}}{A_g}$

Figura 2.7 – Fórmulas dos fatores de massividade para os exemplos estudados por Érica Kimura (2009b)

Os resultados permitiram concluir que as imperfeições iniciais têm uma influência significativa na resistência ao fogo de cada modelo numérico. Outro dos aspetos relevantes foi, os fatores de assimetria ou mono assimetria relativos à ação térmica e às imperfeições globais, quando ocorrem do mesmo lado ou em lados opostos, resultam em valores de tempos de resistência ao fogo distintos.

Na sequência do estudo realizado por Correia, Rodrigues e Silva (2009a), atendendo às temperaturas diferenciais observadas nos pilares metálicos e ao método de cálculo apresentado pelo Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), ao considerar uma distribuição de temperatura uniforme para as situações consideradas, Correia et al. (2010b), apresentaram uma proposta de modificação da norma relativamente a este tipo de cálculo. Para tal, os autores recorreram aos resultados das análises através do STC, considerando nos casos 1 e 3 (figura 2.8) uma divisão da secção transversal em três zonas, em que a temperatura era uniforme. Sendo, a alma, metade do banzo exposto e a outra metade do banzo não exposto. Para os casos 2 e 4 (figura 2.8) as divisões consideradas foram, banzo exposto, banzo não exposto e alma do pilar.

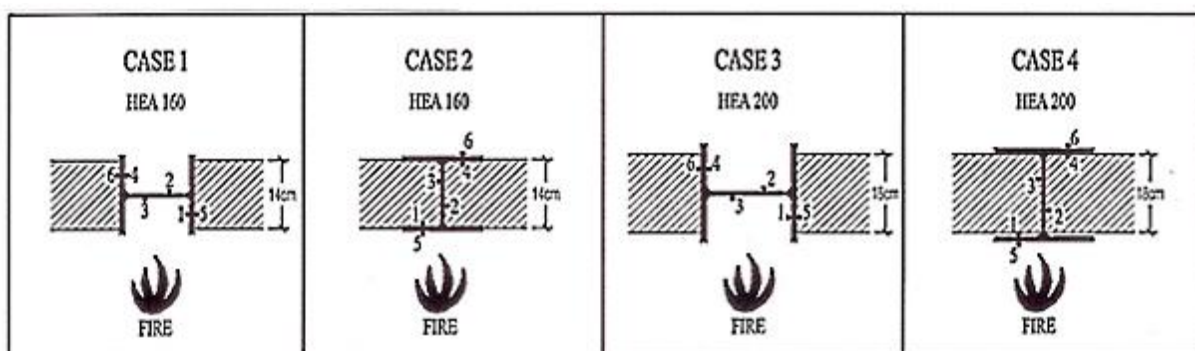


Figura 2.8 - Casos de estudo com a indicação da posição dos termopares na secção transversal, (Correia, Rodrigues e Silva, 2009 a))

Dessa forma, os resultados de temperaturas obtidos nas zonas determinadas, através do STC foram comparados com o método simplificado do Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) para a zona exposta da secção transversal, o que permitiu determinar e propor fatores de redução de temperaturas adequadas para cada uma das três zonas. O método e resultados patentados no

documento poderão servir para uma posterior reformulação dos métodos de cálculo de temperaturas presentes no Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), para o tipo de casos em estudo.

Tsalikis et al. (2011) apresentaram um estudo sobre a encurvadura elástica dos perfis de aço rotulados com gradiente térmico. Analisaram separadamente o efeito do gradiente térmico sobre a mudança da posição do eixo neutro elástico e depois adicionaram o efeito de “*Thermal Bowing*” para assim, investigarem o comportamento conjunto. Usaram duas abordagens distintas para o problema: na primeira, aplicaram a equação da viga - coluna, por forma a estudar o efeito da mudança de posição do centro de gravidade efetivo. Os resultados mostraram que as tensões máximas admissíveis não estavam de acordo com as obtidas a partir das curvas de encurvadura de Euler, para a temperatura máxima da secção transversal. A excentricidade que surgia a partir da mudança do centro de gravidade efetivo não pode ser estudada isoladamente. O deslocamento do centro de gravidade efetivo deve ser sempre menor do que o deslocamento lateral da coluna, para que a equação cumpra os pressupostos iniciais. As curvas de encurvadura aproximam-se das curvas do Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010) para a temperatura máxima, à medida que o gradiente térmico aumenta.

A análise por elementos finitos permitiu-lhes verificar a validade da abordagem simples, para um gradiente térmico específico. Pelo contrário, a análise do modelo de elementos finitos com a aplicação da lei dos materiais elasto-plásticos, conforme proposto pelo Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), deu resultados mais conservadores. Observaram essa diferença a partir da sobreavaliação inicial da tensão de cedência, nas leis bilineares aplicadas ao modelo elástico. Os princípios apresentados neste trabalho constituem um passo importante no sentido de gerar ferramentas analíticas imprescindíveis para o dimensionamento dos elementos em causa. Com a determinação apropriada das leis bilineares de tensão-deformação e da adição dos outros fenómenos que governam uma coluna mesmo à temperatura ambiente, o método pode ser usado com segurança para a previsão dos limites inferiores da encurvadura elástica de pilares de esbelteza média e alta.

Em 2011, Quiel et al., apresentam um procedimento para a determinação da capacidade resistente de vigas - pilar de aço sob a ação do fogo. Estudaram em detalhe a evolução de momentos fletores induzidos tanto pelos gradientes térmicos como pela restrição axial provocada pelas vigas adjacentes aquecidas. Apresentaram um método para prever o comportamento de uma viga - coluna da periferia de um edifício, considerando a resposta tanto como um membro individual, incluindo gradientes térmicos, como a resposta global incluindo as interações dos membros adjacentes. Os métodos apresentados são diretos, não necessitando de interação, podendo por isso ser resolvidos usando uma folha de cálculo ou um algoritmo matemático simples.

2.4.2 Estudos Experimentais

Neste subcapítulo relatam-se estudos experimentais, não obstante alguns deles também numéricos, realizados no âmbito da resistência ao fogo de elementos estruturais de um edifício em estrutura metálica.

O fenómeno de elementos estruturais expostos ao fogo foi analisado por Cooke et al. (1998), com a publicação de um documento no qual fornecem resultados experimentais e teóricos de elementos estruturais expostos ao fogo de um só lado. Fazem igualmente sugestões de como esses dados podem ser aplicados na diminuição dos efeitos do “*Thermal Bowing*”. Para tal, ensaiaram pilares de aço, de betão e paredes de alvenaria, analisando a influência de diferentes parâmetros como a relação comprimento/espessura das paredes, a carga aplicada, o tipo de betão e a curva de fogo de hidrocarbonetos para as lajes. A publicação em análise permite concluir que o fenómeno de “*Thermal Bowing*” pode ser reduzido através do uso de materiais com baixo coeficiente de dilatação térmica, reduzindo a temperatura na secção transversal e aumentando a distância entre a superfície exposta e não exposta.

Em Wang (2000), são apresentados resultados de análises experimentais, focados no comportamento global da estrutura de um edifício, construído a uma escala real, composto por oito pisos em estrutura metálica, realizados no *Building Research Establishment (BRE)*, em Cardington, na Inglaterra. Os testes tinham a finalidade de investigar o desempenho das estruturas (de madeira, de betão e mistas de aço e betão) sob condições de incêndio reais, bem como, fornecer informações experimentais quantitativas para a validação dos vários modelos numéricos publicados, por outros autores em demais trabalhos futuros.

Pamplona Guimarães (2007), analisou na sua dissertação de mestrado o dimensionamento do revestimento ao fogo de estruturas de aço. Nesta literatura são apresentadas várias metodologias para este dimensionamento, com recurso aos métodos simplificados conforme as normas brasileiras. Os ensaios experimentais foram realizados no Brasil com o apoio de métodos avançados, no caso o programa SuperTempCalc (STC). Entre os casos estudados, realça-se a análise de pilares de aço sem proteção ao fogo entre paredes de alvenaria. Deste modo, a autora analisou dois tipos de pilares, W 360 x 32,90 e W 610 x 174, variando a parede de alvenaria entre os banzos e a alma. Por forma, a fazer comparação com o método analítico, são analisados dois fatores de forma como indicado no esquema da figura 2.9 (para o pilar W 360 x 32,90).

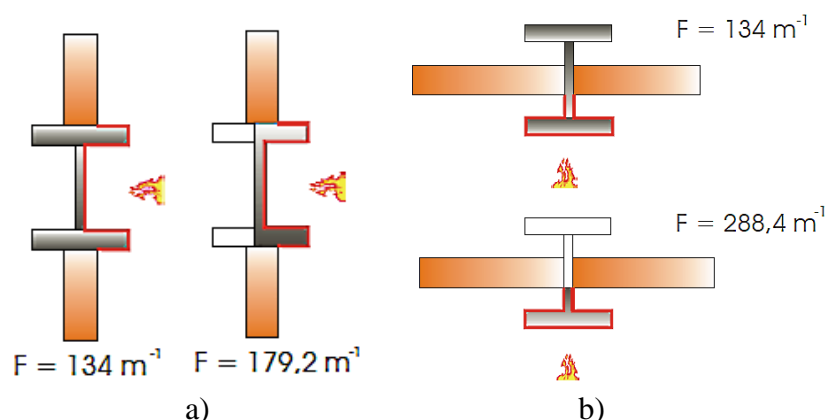


Figura 2.9 - Diferentes valores dos fatores de forma analisados por Silva (2006) a) alma do pilar paralela à parede b) alma do pilar perpendicular à parede (vista em planta), (Pamplona Guimarães (2007))

Sendo o perímetro exposto do pilar de aço o mesmo em ambas as situações para o cálculo do fator de forma F , a variação ocorreu ao nível da área considerada exposta ao fogo, representada e preenchida a cinzento. Após a análise e comparação dos resultados obtidos pelos métodos simplificados e numéricos, em situação de incêndio, para pilares isolados e pilares inseridos em paredes de alvenaria, sugere-se no documento que para o cálculo da força resistente, devido aos factos referidos anteriormente, se utilize para ambos os casos o método simplificado com o maior valor do fator de forma, visto ser considerada a situação mais crítica. Menciona também no estudo a limitação desse fator quando se trata de distribuições de temperatura não uniformes.

A estabilidade dos pilares de aço à temperatura ambiente, é um tema de interesse na pesquisa em causa, podendo ser determinada através do cálculo da carga existente durante a encurvadura, quando esta ocorre na fase elástica do material, designada por carga crítica (P_{cr}) e dada pela fórmula de Euler. No entanto, o comportamento de pilares sujeitos ao fogo é consideravelmente diferente, a rigidez, a restrição ao alongamento térmico provocada pela estrutura adjacente e a distribuição de temperaturas ao longo da secção transversal e longitudinal do pilar, conduzem a uma gradual degradação do aço e por sua vez ao aparecimento de valores de esforços e tensões não verificados à temperatura ambiente.

Em Tan et al. (2007), é relatada uma investigação experimental cujo objetivo foi determinar o tempo de colapso de um pilar metálico, não protegido, submetido à elevação térmica e sujeito às várias condições de restrição axial e rotacional, considerando ainda imperfeições geométricas iniciais e excentricidade do carregamento aplicado. Para estudar o efeito das restrições axiais no tempo de colapso, foi aplicada uma força de compressão constante, correspondente a 50% da força resistente do pilar à temperatura ambiente. Em seguida, os autores aplicaram um aquecimento uniforme à taxa de $8^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ durante o intervalo de tempo necessário à instabilidade global do pilar.

Os ensaios mostraram que os pilares de baixo índice de esbelteza ($\lambda \approx 45$) têm um encurtamento gradual antes da encurvadura, enquanto que os pilares esbeltos encurvam abruptamente. Para além disso, os efeitos de 2ª ordem provocados pela excentricidade da força e imperfeições geométricas iniciais, associadas ao incremento de temperatura, contribuíram significativamente para a redução do tempo de colapso. Ao aumentar as restrições axiais no pilar, as forças internas também aumentaram. A influência do atrito nas ligações retardou o tempo de colapso do perfil durante a fase de aquecimento. Em geral, os efeitos de atrito foram mais notados em pilares de altura reduzida (Kimura, 2009).

A consideração da restrição axial na extremidade do elemento, representou um passo à frente na expansão da esfera do conhecimento, no sentido de se compreender como uma estrutura global pode atuar quando um elemento isolado está sob a ação térmica. Os modelos que permitem obter a evolução da temperatura no elemento estrutural e, consequentemente, a redução da resistência e rigidez, dividem-se basicamente em:

- 1 - Modelos simplificados de cálculo;
- 2 - Modelos avançados de cálculo.

Frantisek Wald (2009), realizou uma análise da evolução das temperaturas em vários elementos estruturais e comparou-as com o Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010). Para tal,

elaborou um esquema experimental à escala real num edifício existente. Wald aproveitou uma fábrica que estava para ser demolida e antes, instrumentou o edifício e realizou o ensaio de simulação de incêndio no mesmo. O estudo foi efetuado para vigas, pilares e ligações metálicas, visando essencialmente uma análise de evolução de temperaturas nos elementos estruturais e nos compartimentos. Na presente dissertação a análise a este trabalho de investigação será apenas focada nos resultados do ensaio de resistência ao fogo de um pilar periférico.

Para que a simulação de incêndio fosse a mais aproximada possível da realidade e, atendendo a que o edifício estava desocupado (contando apenas com o peso próprio da estrutura), o autor adicionou 1100 kg de sacos de areia no piso superior do pilar em estudo, e foram utilizados barros de madeira de pequenas dimensões para simular o efeito do fogo sobre o pilar. Para a obtenção dos resultados de temperaturas no pilar, utilizaram-se termopares, posicionados da forma que se pode visualizar na figura 2.10 a). Após a conclusão do ensaio obtiveram-se os resultados de temperaturas observáveis na figura 2.10 b), onde se pode concluir que não ocorreu o colapso da estrutura.

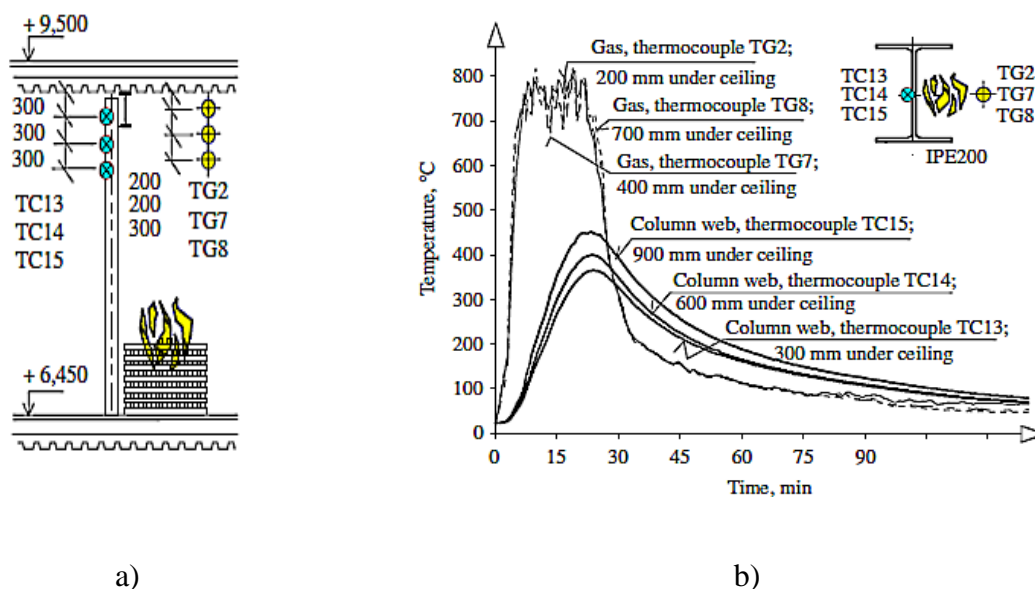


Figura 2.10 - Incêndio localizado num pilar a) Geometria do ensaio b) Temperaturas medidas num pilar sem proteção, durante o ensaio, (Wald, 2009)

As estruturas metálicas sem proteção contra incêndios, tem geralmente um comportamento que não é o mais desejado devido à elevada condutibilidade térmica do aço que leva ao aumento da temperatura nos elementos e posterior perda de resistência. Esse comportamento pode ser melhorado recorrendo, por exemplo, a materiais de proteção contra incêndios.

Correia, Rodrigues e Silva (2009 a), realizaram um estudo sobre pilares de aço inseridos em paredes de alvenaria, com recurso a simulações numéricas e a ensaios experimentais, por forma a analisar a influência das paredes relativamente à evolução da temperatura no elemento quando este se encontrava sujeito à ação do fogo. A relevância do estudo deve-se à influência das paredes que, por um lado, funcionam como elementos de proteção ao fogo dos pilares, devido à baixa condutividade térmica, quando comparada com a do aço, por outro induzem nos pilares temperaturas diferenciais na secção transversal. O Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-

2:2010), como já referido, não tem em conta esse fator, considerando que a resistência ao fogo é determinada como se a evolução da temperatura fosse uniforme em toda a secção.

Nos ensaios realizados pelos autores, foram utilizados dois tipos diferentes de pilares, HEA 160 e HEA 200, com variação da orientação do perfil em relação às paredes, alma paralela e alma perpendicular, foram também consideradas diferentes espessuras da parede de alvenaria. A parte experimental, executada no Laboratório de Estruturas da Universidade de Coimbra, com recurso a um forno a gás, programado para seguir aproximadamente a curva de incêndio padrão, ISO 834, simulando assim, a ação térmica. Utilizaram termopares para medição das temperaturas na secção dos perfis de aço e paredes (figura 2.11).

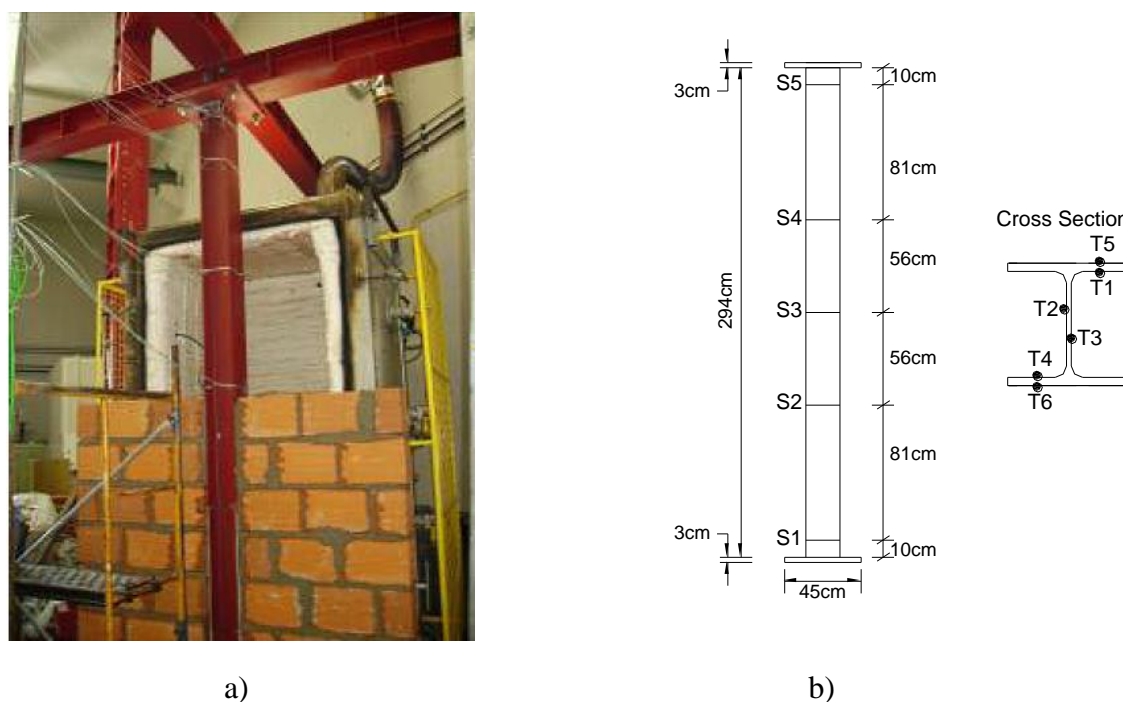


Figura 2.11 - Ensaio em pilares de aço inseridos em paredes a) preparação dos ensaios experimentais b) provete com a posição dos termopares, (Correia, Rodrigues e Silva, 2009 a)

As simulações numéricas foram efetuadas no programa de elementos finitos, SuperTempCalc (STC), onde foram consideradas duas dimensões, e posteriormente comparadas com os resultados experimentais.

Para os casos em que a alma se encontra paralela à superfície da parede, para a maior espessura da mesma, esta desempenhou um papel importante na proteção da alma e banzos relativamente à evolução da temperatura nos perfis de aço. Nos casos em que a alma se encontrava perpendicular à superfície da parede, observaram que no banzo não exposto, as temperaturas eram ligeiramente mais altas quando a espessura da parede era a mais espessa, verificando o contrário nos banzos expostos.

As paredes menos espessas provocaram temperaturas mais elevadas nos perfis, independentemente da orientação dos mesmos.

Para aprofundar a influência dos materiais de proteção contra incêndios na resistência ao fogo das estruturas metálicas, Wei-Youg Wang et al. (2009), realizou um estudo de forma a entender o comportamento dos pilares de aço com perda parcial da proteção contra incêndios. Nessa investigação ensaiou ainda pilares protegidos com 20 mm de material de isolamento projetado, nos quais o comprimento da zona danificada de proteção foi de 7% do comprimento total do pilar para um caso e de 12% para outro (figura 2.12), sendo que as zonas danificadas se encontravam nas extremidades do pilar. Os perfis metálicos estavam sujeitos a cargas axiais de compressão e, a um aumento de temperatura induzido por um forno que seguiu a curva de incêndio padrão, ISO 834 (figura 2.13). Desse modo, foi possível concluir, através dos resultados experimentais e das simulações numéricas que a resistência ao fogo dos pilares de aço com parte da proteção danificada é muito reduzida. Os autores verificaram ainda que, o colapso do pilar ocorre na zona com proteção danificada, onde o aumento da excentricidade da carga induzia uma diminuição da resistência, provocando a variação da percentagem da zona de proteção danificada, o que influenciava no modo de rotura e na resistência global do pilar.

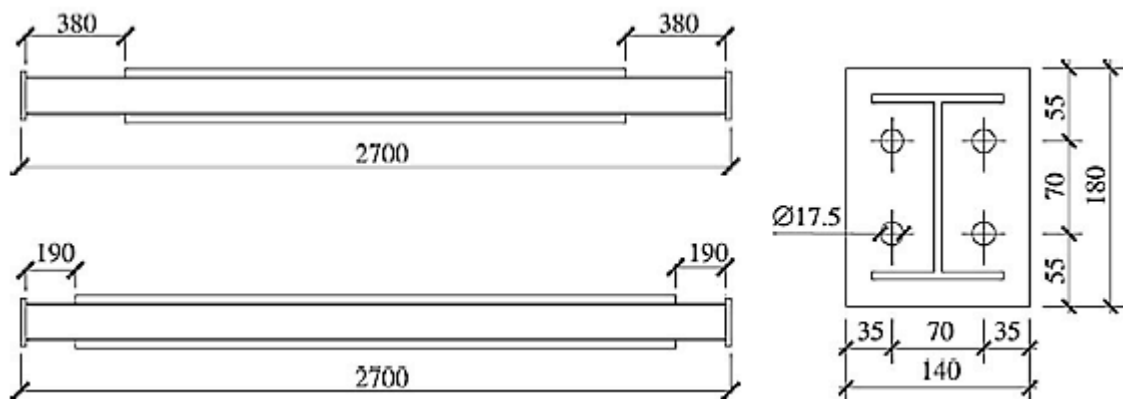


Figura 2.12 - Pormenores dos provetes de ensaio (Wei-youg Wang et al., 2009)

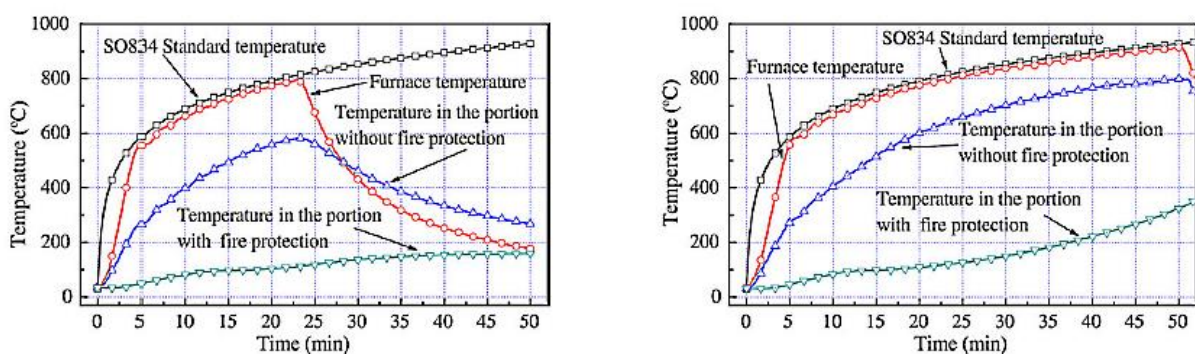


Figura 2.13 - Curvas temperatura versus tempo para os dois pilares ensaiados, (Wei-youg Wang et al., 2009)

Na sequência de vários ensaios e análises feitas sobre o comportamento de pilares de aço inseridos em paredes de alvenaria, Correia et al. (2010b), apresentaram um documento no qual

determinaram o efeito favorável das paredes circundantes nos pilares metálicos quando sujeitos à ação do fogo. Como já mencionado anteriormente, as paredes de alvenaria têm influência no aquecimento diferencial sentido nos pilares, devido à não exposição dos mesmos de um dos lados ao fogo. As elevadas diferenças de temperatura entre as faces aquecida e não aquecida, induzem no pilar uma curvatura na direção do fogo, devido ao efeito de restrição provocado pela estrutura circundante, opondo-se à dilatação do pilar, gerando-se tensões adicionais no perfil, aumentando o esforço axial do mesmo. Este aumento é maior nos pilares totalmente envolvidos pelo fogo, do que nos pilares parcialmente protegidos pelo contacto com as paredes. Para esse estudo foram realizados ensaios experimentais no Laboratório de Estruturas da Universidade de Coimbra, sobre a resistência ao fogo de pilares de aço inseridos em paredes de tijolo com e sem carga e, com e sem contacto com as paredes.

O plano de ensaios foi dividido em duas fases, a primeira consistiu no cálculo da distribuição de temperaturas no interior da secção transversal do pilar ao longo do tempo, a segunda fase baseou-se numa avaliação do comportamento mecânico com o intuito de estimar a resistência ao fogo dos perfis metálicos. Torna-se relevante referir que os casos ensaiados são semelhantes aos que já foram descritos neste documento por Correia et al. (2009b), em que se apresentam oito casos de estudo.

Na análise numérica os autores recorreram ao programa de elementos finitos ABAQUS, por forma a simular o executado nos ensaios experimentais, aplicando 70% da carga de encurvadura à temperatura ambiente. Simularam ainda, dois ensaios adicionais para pilares isolados HEA 160 e HEA 200.

Na figura 2.14 pode observar-se o modelo tridimensional e a malha de elementos finitos, na figura 2.14 a) pilar de aço em contacto com as paredes 2.14 b) pilar de aço. Os conceitos de modelação foram os mesmos para ambos os casos.

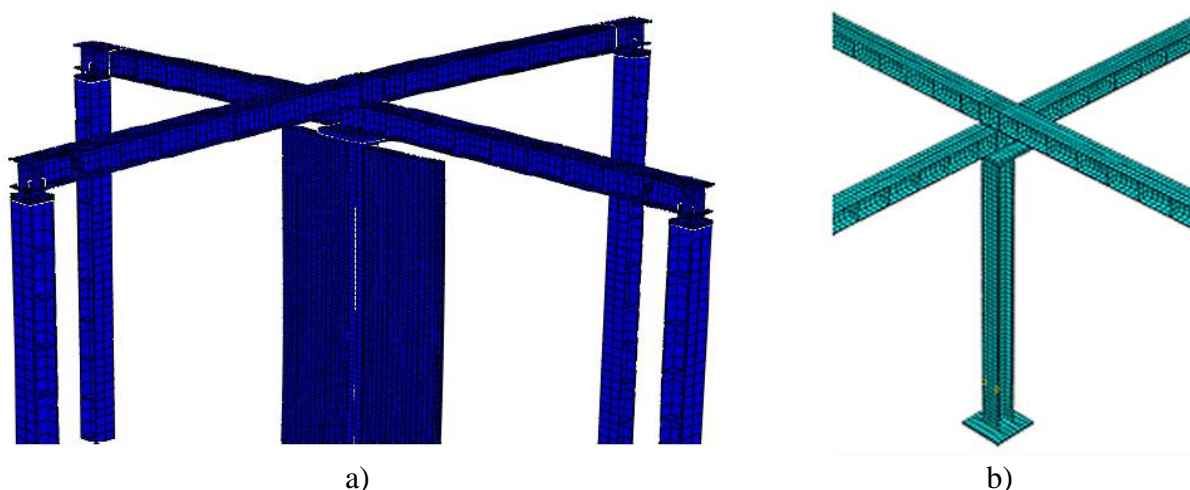


Figura 2.14 - Modelo tridimensional e malha de elementos finitos do pórtico de restrição e pilar a) pilar de aço em contacto com as paredes b) pilar de aço isolado, (Correia et al. 2010b)

Os autores concluíram que as paredes de alvenaria aumentam a capacidade resistente do pilar de aço quando comparado com um pilar isolado, pois em todos os casos analisados o fenómeno de “*Thermal Bowing*”, conduzia à rotura por flexão e não por encurvadura, como verificado

nos pilares isolados. Concluíram também que, quanto maior for a espessura das paredes, maior a resistência dos pilares.

Na sua tese de doutoramento Correia (2011b), realizou um número considerável de ensaios experimentais em perfis metálicos em edifícios. O objetivo do trabalho foi estudar pilares de aço e mistos aço-betão em situação de incêndio, a influência de diversos parâmetros, tais como o contacto com as paredes de tijolo, a rigidez da estrutura circundante, a esbelteza dos pilares e o nível de carregamento aplicado foram alvo de um estudo paramétrico realizado experimental e numericamente.

Os resultados dos ensaios experimentais foram comparados com o estudo numérico, reproduzindo as condições usadas nos ensaios experimentais, com a finalidade de fornecer dados valiosos para desenvolvimento ou melhoria de métodos de dimensionamento de pilares sujeitos à ação do fogo. O autor teve como ponto fulcral reproduzir, tanto quanto possível, em laboratório, as condições a que o pilar está sujeito, num edifício real em incêndio.

O trabalho experimental comportou a realização de ensaios em pilares de aço da secção H embebidos em paredes, isolados e mistos aço-betão, parcialmente preenchidos com betão com dilatação térmica restringida; este trabalho foi efetuado no Laboratório de Estruturas da Universidade de Coimbra (figura 2.15). Os resultados foram comparados com os de ensaios realizados no Bundesanstalt für Material-forschung und -prüfung (BAM), em Berlim, na Alemanha.

A modelação numérica dos ensaios foi realizada utilizando os programas de computador de elementos finitos SUPERTEMPCALC e ABAQUS. Foi realizada uma análise geométrica e material não linear. A modelação numérica foi efetuada de forma minuciosa, tendo sido obtida uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, tanto em termos de temperaturas como de forças de restrição e da deformada dos pilares.

Para os pilares de aço embebidos nas paredes, o estudo incidiu sobre a influência das paredes na distribuição das temperaturas ao longo da secção dos pilares. Os perfis embutidos em paredes comportam-se de maneira diferente dos perfis isolados, quando sujeitos à ação do fogo, devido ao gradiente térmico e à restrição imposta pela existência das mesmas. Para os pilares de aço isolados, a principal conclusão retirada do trabalho foi sobre a influência real da restrição à dilatação, considerada simultaneamente com a restrição à rotação; esses dois tipos de rigidez têm um efeito contrário na resistência ao fogo dos pilares. O parâmetro que teve maior influência na resistência ao fogo dos perfis foi o nível de carregamento.

Os principais resultados da investigação foram a proposta de métodos para a avaliação da evolução da temperatura na secção transversal dos pilares com aquecimento diferencial em contacto com paredes, diagramas de interação Esforço Axial – Momento Fletor, assim como, propostas para o cálculo da temperatura crítica e resistência ao fogo dos perfis de aço.



a)



b)

Figura 2.15 - Instalações experimentais usadas nos ensaios de resistência ao fogo de pilares a) pilares em contacto com paredes b) pilar isolado (Correia, 2011)

Correia et al. (2012a) apresentaram no congresso internacional “Structures in Fire 2012”, na Suíça, um artigo no qual é estudado o comportamento dos pilares de aço isolados, com dilatação térmica restringida. O Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), refere que as ações indiretas, como a restrição ao alongamento térmico em elementos estruturais devem ser consideradas no projeto de segurança contra incêndios de estruturas, embora o método de cálculo simplificado proposto por este não contabilize o efeito provocado pela estrutura circundante. No estudo em análise, foram realizados ensaios experimentais e modelações numéricas de forma a obter resultados que promoviam o desenvolvimento futuro de novos métodos de cálculo simplificados, para o cálculo da resistência de pilares de aço ao fogo.

Para a realização dos ensaios experimentais os autores recorreram a um sistema de pórticos com a capacidade de simular restrições 3D e de variação da rigidez de 13, 45 e 128 kN/mm. Foram ensaiados pilares HEA 160 e HEA 200 para dois níveis de carga 30% e 70% da carga de encurvadura à temperatura ambiente para as diferentes secções transversais. A carga térmica aplicada corresponde à curva de incêndio padrão, ISO 834. A modelação numérica foi realizada com recurso ao programa ABAQUS, simulando o executado nos ensaios experimentais e fazendo variar o parâmetro adicional de esbelteza.

Os autores apontaram como contraditória a ideia geral de que em estruturas reais, maior rigidez da estrutura circundante conduz a uma redução das temperaturas críticas e, portanto, da resistência ao fogo dos pilares de aço. A redução das temperaturas críticas com o aumento da rigidez da estrutura circundante é insignificante, levando a concluir que o sistema de restrição relativamente ao alongamento térmico não demonstrava grande influência no comportamento dos pilares sujeitos a ações térmicas. O nível de carga aplicado, pelo contrário, manifestava

elevada influência no comportamento do pilar quando sujeito à ação da temperatura. Podem visualizar-se essas conclusões a partir da análise da figura 2.16.

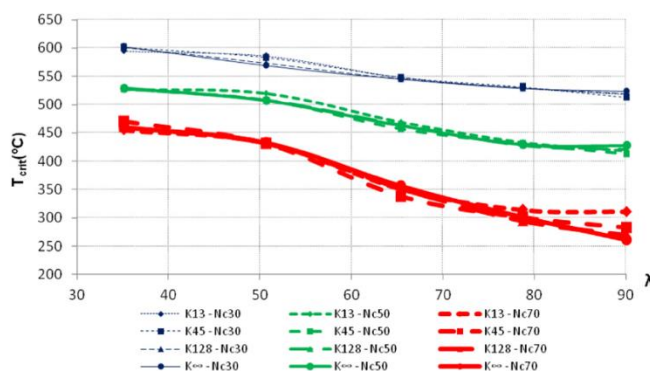


Figura 2.16 - Variação dos tempos críticos de pilares de aço, em função da esbelteza para diferentes níveis de carregamento e diferentes tipos de rigidez da estrutura circundante, (Correia et al., 2012a)

O comportamento dos pilares de aço em contacto com paredes de alvenaria, em situação de incêndio, demonstrou ser consideravelmente diferente do comportamento dos pilares isolados sujeitos à ação do fogo. Temperaturas diferenciais na secção transversal do pilar conduziram ao desenvolvimento de tensões de origem térmica e momentos fletores, provocando deslocamentos do centro de gravidade da secção para o lado não aquecido e consequente inversão dos momentos fletores.

Correia et al. (2012b) na sequência dos ensaios realizados para pilares isolados com dilatação térmica restringida, efetuaram um estudo relativamente ao comportamento ao fogo de pilares de aço embutidos em paredes de alvenaria com alongamento térmico restringido.

Esse trabalho foi igualmente apresentado no “Structures in Fire 2012”; na Suíça, os ensaios experimentais são idênticos aos praticados nos pilares isolados com dilatação térmica restringida, com o acréscimo das paredes de alvenaria e da aplicação da ação térmica de um só lado, fazendo variar também a sua orientação entre o eixo fraco e forte de inércia, ou seja, alma do pilar paralela ou perpendicular às paredes de alvenaria.

Nas simulações numéricas os autores recorreram ao programa de elementos finitos ABAQUS, simulando os ensaios experimentais desenvolvidos e dois tipos de carregamentos distintos, 50% e 70% da carga de encurvadura à temperatura ambiente.

Com o aumento da temperatura no aço, o módulo de elasticidade e a tensão de cedência sofreram alterações, provocando um deslocamento do centro de gravidade para o lado frio da secção do pilar, conduzindo ao aparecimento de momentos fletores adicionais, opostos aos momentos estimulados pelo aumento da temperatura na secção e restrição rotacional, provocando a flexão do pilar para o lado mais frio. Para que se pudesse avaliar o comportamento estrutural, o documento propõe duas abordagens: a primeira considerando uma área reduzida da secção transversal na parte aquecida (figura 2.17 e 2.18), a segunda considerando a tensão

de cedência afetada dos coeficientes definidos no Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), devido ao aumento de temperatura no aço.

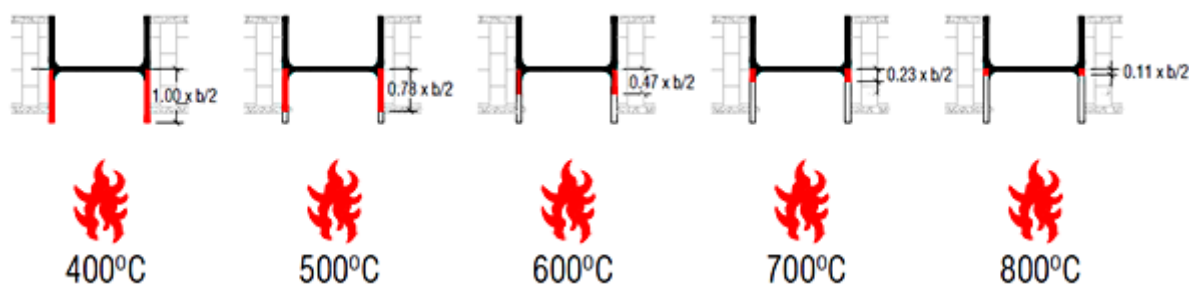


Figura 2.17 - Análise da resistência plástica de um pilar de aço em contacto com paredes, com a alma do perfil paralela à parede, i.e, com o gradiente térmico ao longo dos banzos, (Correia et al., 2012b)

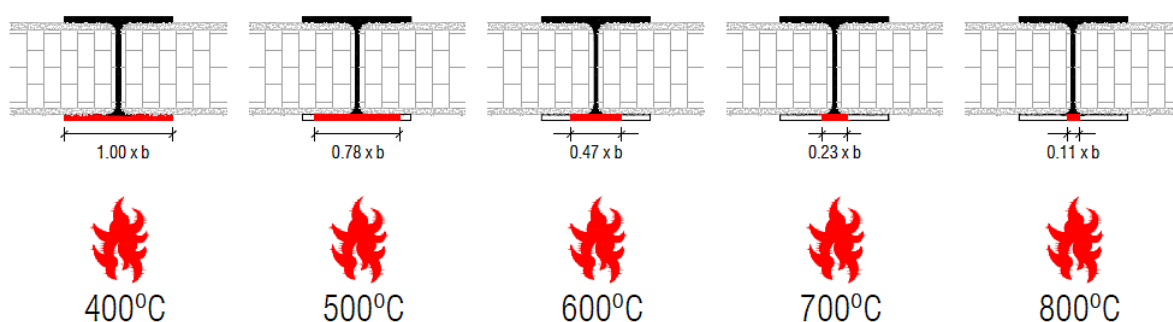


Figura 2.18 - Análise da resistência plástica de um pilar de aço em contacto com paredes, com a alma do perfil perpendicular à parede, i.e, com o gradiente térmico ao longo da alma, (Correia et al., 2012b)

Após a investigação do mecanismo de falha dos pilares de aço inseridos em paredes, com elevados gradientes térmicos, os autores verificaram, que em todos os casos estudados e constantes no artigo em análise, relativos a pilares em contacto com as paredes de alvenaria, as temperaturas na secção transversal do pilar eram mais baixas e a resistência ao fogo do mesmo, mais elevada, quando comparadas com pilares de aço isolados. O nível de carga, a espessura das paredes e a rigidez da estrutura circundante, provaram ter grande influência sobre as temperaturas e os tempos críticos de rotura dos pilares.

Dwaikat et al. (2012), efetuaram um estudo que tinha por base investigar a capacidade mecânica e o desenvolvimento de gradientes térmicos ao longo da secção transversal de pilares de aço sujeitos à ação do fogo. A preocupação dos autores prendia-se com a variabilidade de situações a que um pilar está sujeito quando é parte integrante de uma estrutura, ou seja, a carga axial que atua sobre si, a exposição ao fogo não uniforme da sua secção e os momentos induzidos por esta, são fatores que têm influência no comportamento do pilar quando sujeito a uma situação de incêndio.

Para a avaliação do comportamento dos pilares de aço, os autores realizaram ensaios experimentais na Universidade de Michigan; recorrendo a um forno e a um sistema experimental existente na mesma Universidade, pode visualizar-se na figura 2.19.

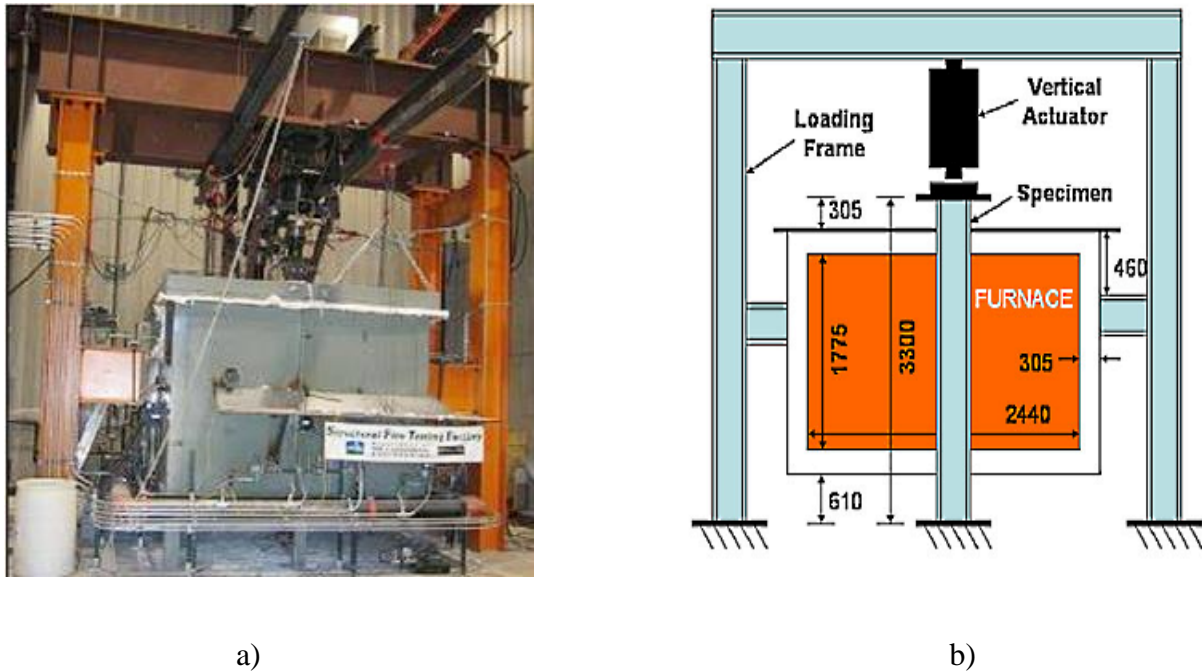


Figura 2.19 - Instalação experimental a) Preparação dos ensaios na instalação experimental b) Esquema da instalação experimental do laboratório, (Dwaikat et al., 2012)

O ensaio experimental consistiu em quatro pilares de aço, de secção transversal, W8 x 48, com 3,30 metros de altura, revestidos com material isolante, dispostos e designados de forma diferente, para permitir o desenvolvimento de gradientes térmicos no eixo fraco e forte de inércia. As designações C1 - W e C1 - S correspondem ao perfil metálico cuja espessura da camada de proteção é de 44 mm, figura 2.20, enquanto que a designação W e S dizem respeito ao desenvolvimento dos gradientes térmicos segundo o eixo fraco ou forte (*weak or strong*). A designação C2 diz respeito à espessura do material de proteção, correspondendo no caso a pilares com 38 mm de espessura. Em qualquer um dos casos, os pilares foram aquecidos simultaneamente nos quatro lados, estando sujeitos a cargas axiais de compressão de 25% (C1) e 45% (C2) da carga última de encurvadura, calculada à temperatura ambiente, aplicada em incrementos de 200 kN, num intervalo de aproximadamente dez minutos e mantida até ao fim do ensaio.

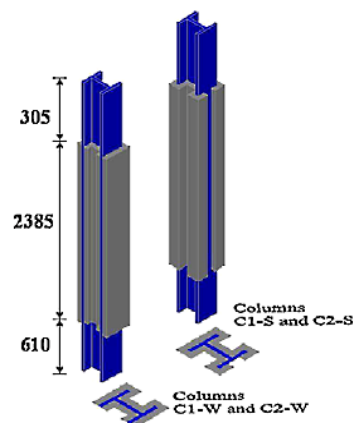


Figura 2.20 - Esquema do isolamento dos pilares, com as dimensões em milímetros, (Dwaikat et al., 2012)

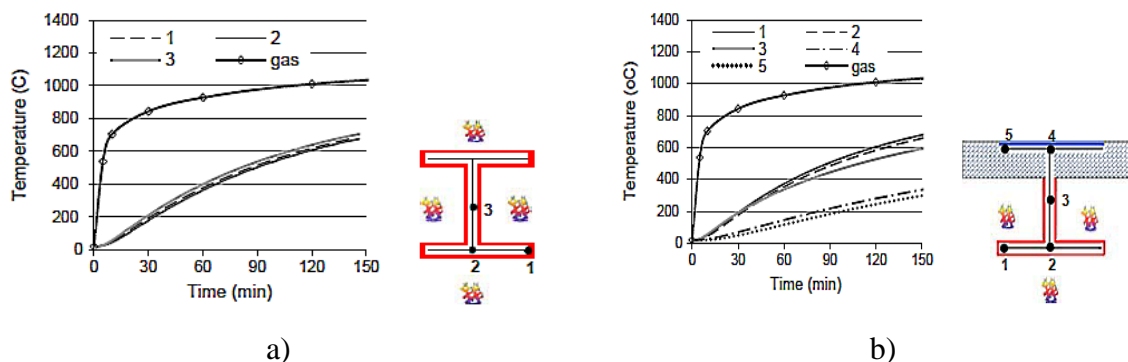
Mais uma vez e à semelhança de outros trabalhos já descritos, os ensaios experimentais serviram também para a validação de modelos numéricos desenvolvidos através do programa SAFIR, por forma a analisar detalhadamente o efeito do desenvolvimento de gradientes térmicos na secção transversal dos pilares de aço. Este efeito provoca o deslocamento do centro de gravidade da secção transversal da peça para a zona mais fria, desenvolvendo-se momentos fletores adicionais na secção.

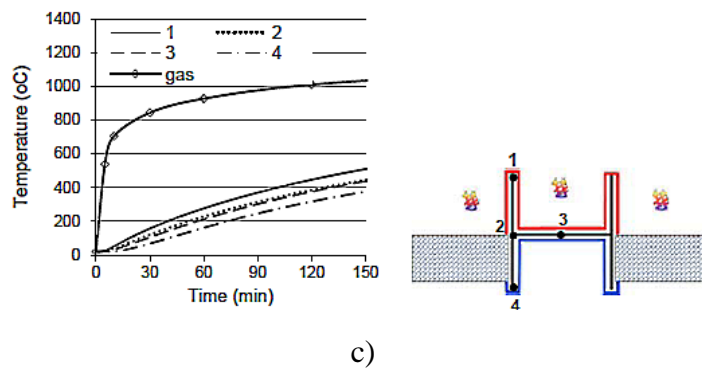
Após a análise dos resultados experimentais e numéricos, os autores detetaram uma alteração na capacidade resistente da secção para a combinação da carga axial de compressão e de flexão. Concluíram ainda que o local de cedência dos pilares ocorreu onde a temperatura era mais elevada e o momento fletor, o menor, devido ao efeito dos gradientes térmicos.

A resistência ao fogo dos pilares apresentou grande variabilidade de resultados em relação ao eixo forte e fraco de inércia.

Anil Agarwal et al. (2014), publicaram também um documento sobre os efeitos dos gradientes térmicos nos pilares de aço, onde realizam uma avaliação do comportamento das colunas quando submetidos a gradientes térmicos originados pela carga de incêndio. Para tal, efetuaram ensaios experimentais e elaboraram um estudo numérico recorrendo ao *software* de cálculo de elementos finitos ABAQUS. A análise numérica foi, à semelhança de trabalhos já descritos, calibrada utilizando os resultados dos ensaios experimentais. A abordagem da simulação numérica foi também utilizada para a realização dos estudos paramétricos, possibilitando assim, a avaliação da resistência e do comportamento de falha dos perfis de aço quando sujeitos a diferentes configurações de aquecimento. As análises efetuadas basearam-se na transferência de calor, através de um forno, e na aplicação de carga (não constante). As colunas foram submetidas ao aquecimento dos quatro lados, tendo distribuição uniforme ao longo da secção transversal, figura 2.21 a). Os autores afirmam no documento que a distribuição uniforme da temperatura é uma das premissas que pode potencialmente levar à superestimação da capacidade de carga do pilar. Mencionam ainda que as equações existentes para o cálculo da resistência ao fogo dos perfis de aço, apenas consideram o aquecimento uniforme, sendo que numa estrutura real em situação de incêndio o aquecimento não é uniforme para o caso dos pilares periféricos da mesma, que apenas sofrem aquecimento de um só lado, produzindo gradientes térmicos na secção transversal, situação que os autores tentaram simular nos ensaios efetuados.

Posteriormente as colunas foram submetidas ao aquecimento não uniforme de forma parcial, para produzir gradientes térmicos na secção transversal, figura 2.21 b) e c).





c)

Figura 2.21 - O aquecimento efetuado em diferentes locais da secção dos pilares W12x58 para a) o aquecimento uniforme de toda a secção (b) gradiente térmico ao longo da alma e (c) gradiente térmico ao longo dos banzos, (Anil Agarwal et al. (2014))

Os resultados mostram que o comportamento e a resistência dos pilares de aço têm forte dependência da esbelteza dos perfis, da carga axial aplicada e da configuração de aquecimento. Este estudo permitiu observar os modos de flexão segundo o eixo forte e fraco de inércia, e a encurvadura à flexão-torção.

Os resultados mostram também que as colunas submetidas ao aquecimento uniforme têm significativamente maior entrada de calor. Na maioria dos casos os pilares submetidos a um aquecimento não uniforme têm o seu momento de rotura quando sujeitos a temperaturas médias mais baixas do que os pilares submetidos a aquecimento uniforme. No entanto, os perfis de aço submetidos ao aquecimento uniforme alcançam a temperatura em que se dá a rotura dos mesmos mais rápido do que os submetidos ao aquecimento não uniforme, devido à já mencionada entrada de calor mais elevada. Importa referir que existiram exceções nos perfis muito esbeltos submetidos a cargas axiais superiores a 50% da sua capacidade de carga de encurvadura à temperatura ambiente.

Os resultados obtidos a partir do estudo paramétrico foram utilizados para desenvolver equações de cálculo para colunas de aço de banzo largo submetidos a aquecimento não uniforme, resultando em gradientes térmicos através da secção transversal.

Os autores concluíram que o gradiente térmico num pilar periférico altera o diagrama plástico de interação P-M (carga axial – momento fletor) e que o pressuposto de distribuição uniforme da temperatura resulta numa estimativa conservativa da capacidade resistente da secção.

3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1. Condições Gerais

A resistência dos perfis de aço é fortemente condicionada pelas condições em que os mesmos se encontram inseridos num edifício (as chamadas condições de fronteira). Parâmetros como o contacto do perfil com as paredes de alvenaria da construção têm influência na resistência ao fogo das colunas de aço.

As paredes podem ser benéficas no comportamento dos pilares de aço sujeitos à ação do fogo, pois protegem uma grande superfície lateral das elevadas temperaturas, por outro lado, têm uma influência desfavorável porque conduzem a um aquecimento diferencial da secção transversal, levando ao aparecimento de fenómenos como o “Thermal Bowing”, que consequentemente provocam a diminuição da capacidade resistente da coluna de aço. Os métodos utilizados no cálculo foram os do Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), tendo em consideração que não têm em conta o aspeto mencionado anteriormente, a determinação da resistência é feita com base no aquecimento uniforme, ou seja, desprezando aspetos que poderão contribuir para a capacidade resistente do pilar.

Neste capítulo são descritos os vários aspetos relacionados com os ensaios experimentais, para além de serem justificados todos os procedimentos experimentais utilizados.

O trabalho experimental foi realizado com o objetivo principal de estudar os perfis de aço HEA 100 embutidos em paredes, com restrição térmica ao alongamento, em situação de incêndio, possibilitando uma avaliação rigorosa da evolução das temperaturas, do esforço axial de origem térmica e da influência de parâmetros como a orientação dos pilares, a espessura das paredes de alvenaria e a capacidade de carga do pilar.

O estudo paramétrico foi utilizado para se efetuar uma análise sobre a evolução das temperaturas nesses elementos, fazendo-se variar diferentes parâmetros, tais como:

- Espessura da parede;
- Orientação da alma do perfil em relação à parede;
- Nível de carregamento.

No Anexo I, realiza-se a caracterização geométrica do perfil ensaiado.

Foram ensaiados três tipos de amostras diferentes, pilar isolado, pilar com a alma paralela e perpendicular à parede de alvenaria.

O estudo experimental tem a vantagem de permitir analisar um determinado fenómeno em condições reais, sem a interferência de processos ou modelos de carácter teórico. Porém, é de salientar que existem imperfeições e erros humanos e técnicos que podem afetar as medições das grandezas em estudo, embora se tente minimizar estes inconvenientes.

3.2. Instalação Experimental

Apresenta-se na figura 3.1 o modelo experimental, construído no Laboratório de Estruturas e Ensaio de Materiais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, por forma a permitir os ensaios e a avaliação do comportamento de pilares, quando inseridos em paredes de edifícios, e submetidos à ação do fogo.

Na figura 3.1, nomeasse os meios envolvidos no modelo experimental, o macaco hidráulico para a aplicação do carregamento, o pórtico de restrição tridimensional usado para simular o provete inserido numa estrutural real, o pilar HEA 100 e a parede de alvenaria que formam o provete de ensaio e por fim a estrutura externa que serve de suporte para a ligação dos transdutores de deslocamento.

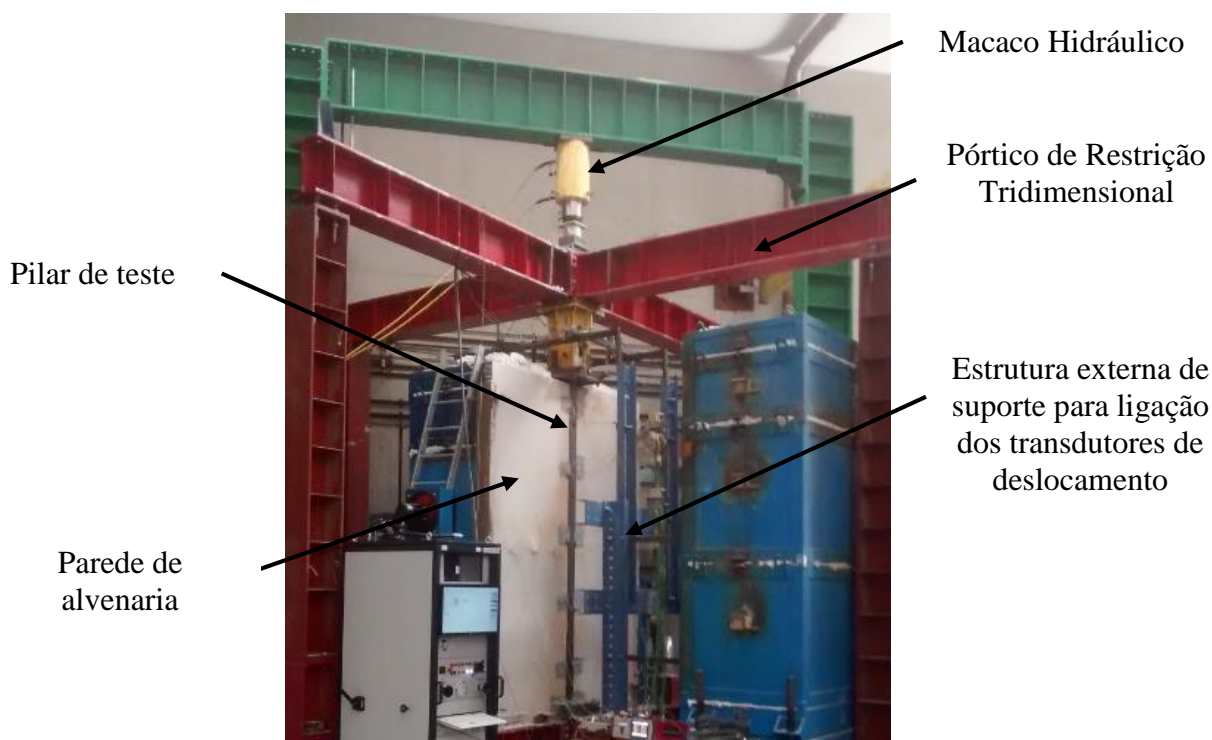


Figura 3.1 - Vista global do sistema experimental

De forma distinta do sistema utilizado em Correia (2011), figura 3.2 a), para a realização dos ensaios a descrever, o sistema utilizado era composto por vigas superiores que se cruzavam no mesmo plano, como se pode observar na figura 3.2 b).

Os provetes ensaiados seguiram o esquema apresentado na figura 3.2 c), compreendendo um pilar metálico em dois painéis de paredes.

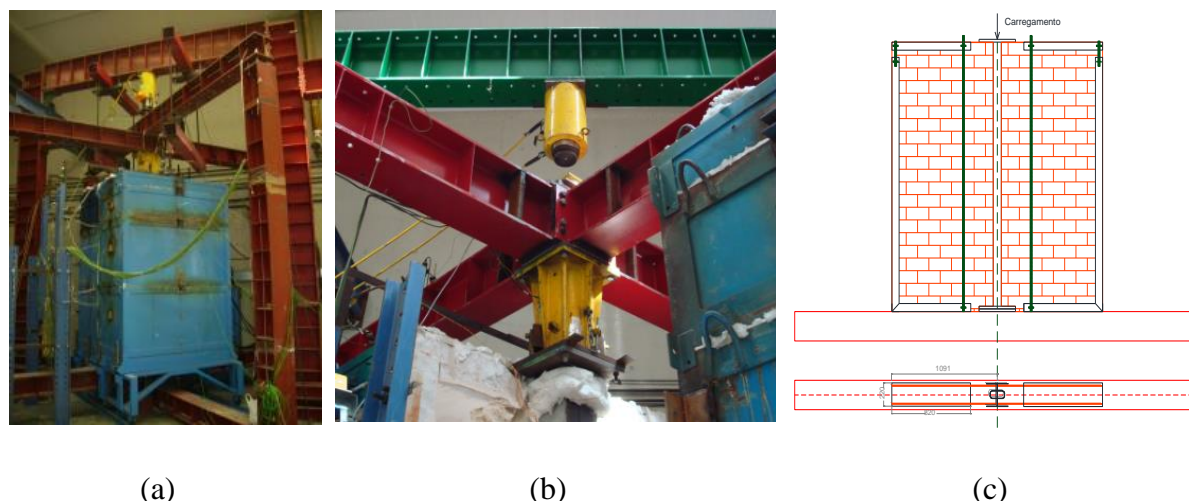


Figura 3.2 - (a) Esquema de ensaio utilizado em Correia (2011), (b) Esquema de ensaio para pilares inseridos em paredes proposto, (c) Provete completo para ensaios em paredes

Do modelo experimental apresentado anteriormente, importa mencionar a relevância da estrutura de aço circundante, pois esta permitiu simular o comportamento do pilar quando este faz parte integrante da estrutura de um edifício. O uso desse tipo de estrutura torna possível não só ter em consideração a rigidez axial, mas também a rigidez rotacional, podendo assim, aproximar o comportamento real do pilar quando sujeito à ação do fogo, tendo em conta a sua envolvente (figura 3.3 a)). A estrutura de restrição em causa era composta por dois pórticos, dispostos ortogonalmente, em que cada pórtico comportava por dois pilares e duas vigas, uma superior e uma inferior.

Foi ainda utilizado um dispositivo especial, colocado nas vigas superiores do pórtico para a medição das forças de restrição durante o ensaio.

As ligações entre vigas e pilares de cada pórtico foram executadas com parafusos M24 da classe 8.8, à exceção das ligações das vigas superiores, onde se utilizaram varões roscados M27, classe 8.8 com aproximadamente 250 mm de comprimento, ligados rigidamente aos banzos inferiores das vigas superiores. O tipo de ligação adotado estava relacionado com a necessidade de transmitir toda a carga aplicada diretamente ao pilar a ensaiar, consentindo um ajuste da posição das vigas superiores, tendo um comportamento, até ao seu aperto, semelhante ao de um “slide” (figura 3.3 b)).

Este sistema de ensaio tinha ainda outra particularidade de grande importância que se prendia com a capacidade de simular diferentes valores de rigidez da estrutura circundante, através de furações nos banzos das vigas do pórtico de restrição, permitindo assim, a montagem dos pilares periféricos em diferentes posições.

Devido a inúmeros fatores, alguns já mencionados no Estado da Arte, é limitado o número de ensaios, optando-se por esse motivo simular a rigidez da estrutura circundante apenas com o valor de 13 kN/mm.



a)



b)

Figura 3.3 - Instalação experimental a) vista frontal b) pormenor da ligação viga-pilar dos pilares periféricos do pórtico de restrição

Durante o ensaio, os provetes estiveram sujeitos a uma carga constante igual a 30% ou 60% do valor de cálculo da sua carga de encurvadura à temperatura ambiente, Eurocódigo 3 – Parte 1.1 (EN 1993-1-2:2010), dependendo se trata do perfil com a alma perpendicular ou paralela à parede de alvenaria, respetivamente. Com a aplicação dessa carga pretendeu-se simular as condições de serviço a que um pilar está sujeito numa estrutura real.

Para a aplicação da carga utilizou-se um macaco hidráulico de 3 MN, acoplado ao pórtico de restrição, constituído por dois pilares HEB 500 de 6,50 m de altura e uma viga HEB 600 de 4,50 m de comprimento, ambos os elementos da classe de aço S355.

A carga aplicada foi controlada por uma célula de carga com a capacidade de 2 MN posicionada logo abaixo do atuador para medição da carga de serviço aplicada. Para a amarração do pórtico de restrição bidimensional, houve a necessidade de uma amarração à laje do laboratório usando varões *dywidag* de 36 mm de diâmetro.

Os pilares ensaiados foram conectados ao sistema de restrição por meio de chapas metálicas de 30 mm, com furos de 25 mm de diâmetro. No estudo prévio do sistema de ensaio mostrou-se necessário colocar um maior número de chapas soldadas entre as vigas superiores e inferiores do sistema de restrição, a fim de realizar a ligação do provete com o esquema de ensaio pré-existente. Na viga do topo do pilar foi soldada uma chapa para fins de ligação e na viga da base do pilar, foram necessárias três chapas sobrepostas, pois o sistema de ensaio foi projetado para pilares com maior comprimento.

A instrumentação foi constituída basicamente por termopares, transdutores de deslocamento e células de carga, um sistema de ensaio que comporta um atuador servo-hidráulico da marca ENERPAC, modelo CLRG-300-10 com capacidade de aplicação de carga de 3 MN, por sua vez conectado a uma central servo-controladora Modelo W+B 3000. O atuador servo-hidráulico foi fixado no pórtico de reação, acima das vigas do pórtico de restrição.

Para efetuar medição das deformações verticais nas extremidades do pilar e consequentes rotações durante o ensaio, foram utilizados oito *LVDT's* (*Linear Variable Differential Transformers*), dispostos em forma de quadrado entre si, encontrando-se quatro na extremidade inferior e quatro na extremidade superior do pilar.

Com as medições obtidas através da utilização dos quatro transdutores de deslocamento em cada extremo do pilar de ensaio, tornou-se possível medir de forma indireta as rotações. Na figura 3.4 pode observar-se o posicionamento dos *LVDT's* utilizados.

O deslocamento axial do pilar foi determinado a partir da diferença entre as médias aritméticas dos transdutores de topo e da base do perfil.

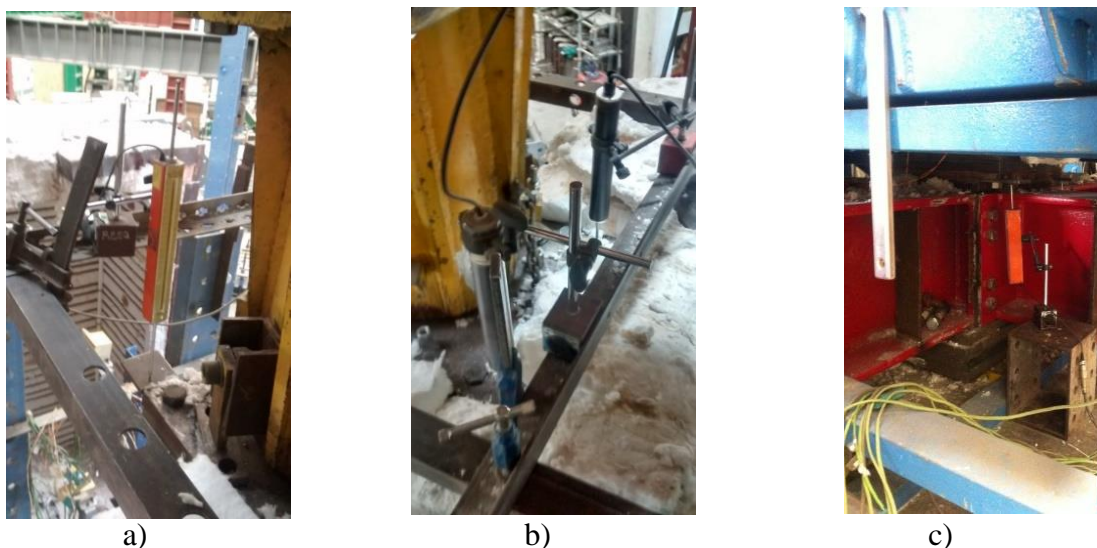


Figura 3.4 - Instalação de LVDT's a) no centro do pórtico, na parte superior b) no topo do pilar c) na base do pilar

Os deslocamentos laterais do pilar foram medidos a partir da instalação de três transdutores de deslocamento de cabos, colocados em duas direções ortogonais a 0,75 m, 1,50 m, 2,25 m e 3,00 m de altura em relação à base do pilar, possibilitando a monitorização dos deslocamentos do pilar em relação ao eixo fraco no ensaio do pilar com a alma paralela à parede e eixo forte, no ensaio do pilar posicionado com a alma perpendicular à parede (figura 3.5). Assim, tornou-se possível traçar gráficos com a deformada dos pilares, para diferentes instantes de tempo. Esses gráficos serão alvo de análise no subcapítulo 3.5 da presente dissertação.



a)

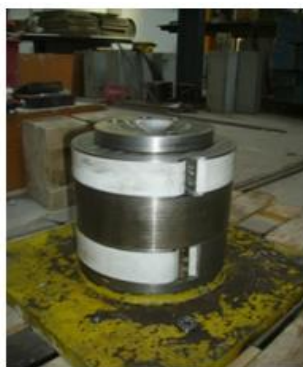


b)

Figura 3.5 - Medição das deformadas dos pilares, durante os ensaios, é possível visualizar a estrutura de apoio à instalação dos transdutores de fio a) perfil com a alma paralela b) perfil com a alma perpendicular

Para a medição e registo das forças de restrição geradas no pilar, pela estrutura circundante, durante o ensaio foi utilizado um dispositivo especialmente concebido e construído no laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. Consiste num dispositivo, constituído por um cilindro oco em aço de grande rigidez ligado à viga superior do pórtico de restrição. No interior do cilindro, existia um outro cilindro maciço que comprimia uma célula de carga de 3 MN que se encontrava no interior do primeiro. O cilindro maciço estava revestido a *teflon* na sua superfície lateral, tendo em vista a redução do atrito (figura 3.6).

Este dispositivo permitiu que as forças de origem térmica geradas durante os ensaios fossem medidas com precisão.



a)



b)

Figura 3.6 - Dispositivo de medição das forças axiais de origem térmica, durante os ensaios a) cilindro maciço revestido exteriormente com *teflon* b) posicionamento do dispositivo entre o provete e as vigas superiores do pórtico de restrição

Importa mencionar que como a força foi aplicada acima do sistema de restrição, parte dela poderia ser redistribuída para os pilares externos, antes de chegar à coluna de ensaio. Dessa forma, a força medida pelo dispositivo apresentado anteriormente, mostrava o valor real da força normal que estava a atuar no pilar.

A figura 3.7 a) permite a visualização dos rasgos feitos na parede de alvenaria para o caso do pilar com a alma paralela à mesma. Posteriormente a parede foi transportada para o pórtico de restrição, sendo assente sobre a viga inferior do pórtico, figura 3.7 b). Seguidamente efetuou-se a ligação da mesma com o pilar, realizada diretamente com argamassa de cimento, figura 3.7 c).

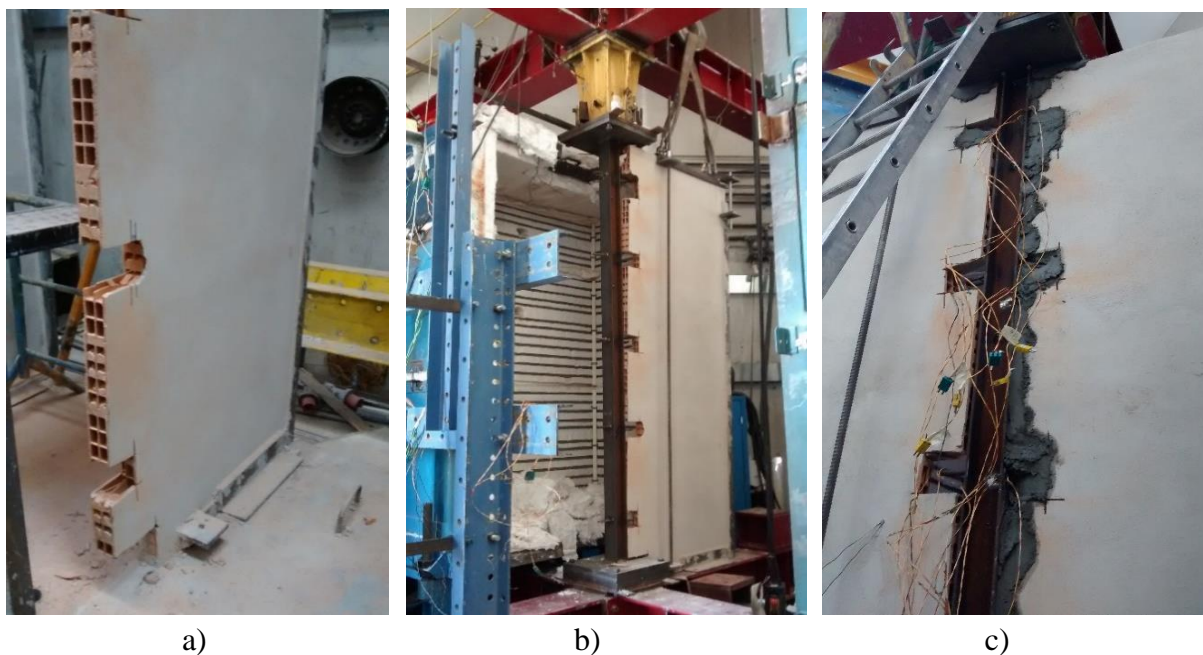


Figura 3.7 - Pormenores de ligação entre as paredes, o pilar com a alma paralela às mesmas e o pórtico a) rasgos para posterior ancoragem da parede à coluna de teste b) ligação pilar – parede c) ancoragem da ligação pilar – parede

A figura 3.8 a) permite a visualização dos rasgos feitos nas paredes de alvenaria para o caso do pilar com a alma perpendicular às mesmas. Posteriormente as mesmas foram transportadas para o pórtico de restrição, sendo assentes sobre a viga inferior do pórtico, figura 3.8 b). Seguidamente efetuou-se a ligação das paredes com o pilar, realizada diretamente com argamassa de cimento, figura 3.7 c).

Para a construção das paredes, executadas separadamente do esquema de ensaio, foi projetado um quadro metálico composto por perfis do tipo UPN 160, no subcapítulo 3.3 será feita a descrição e apresentação do mesmo .

A logística de transporte das paredes de alvenaria para ambos os casos foi efetuada com auxílio de uma ponte rolante.

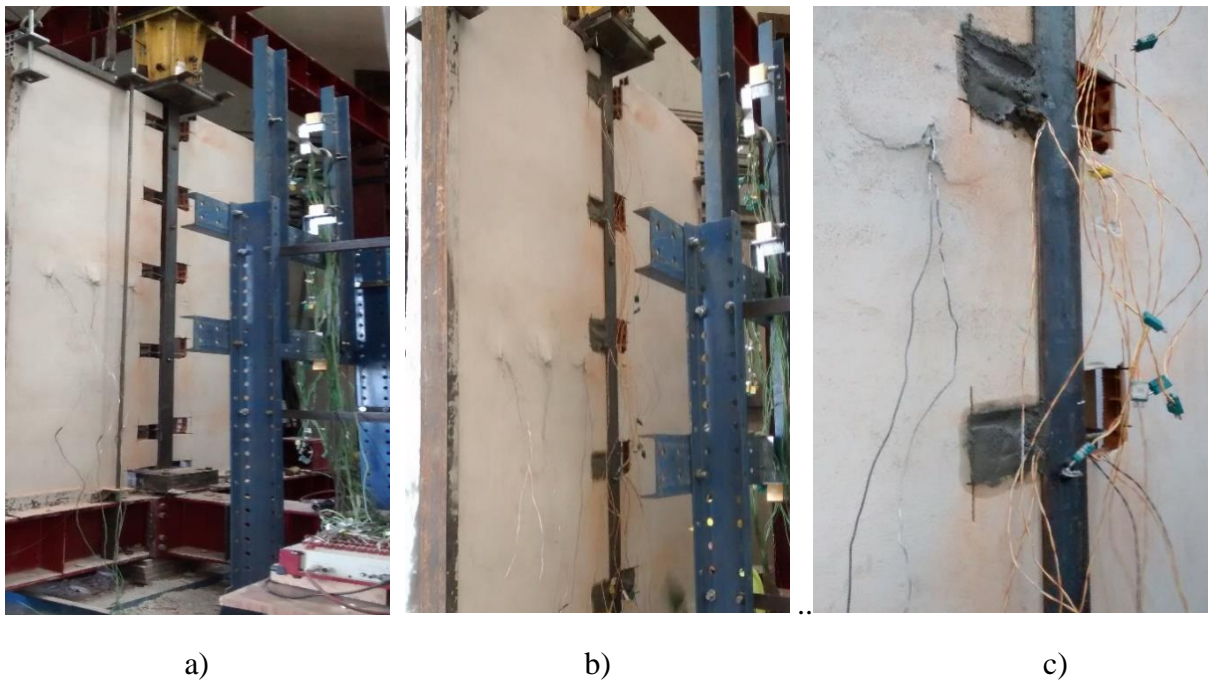


Figura 3.8 - Pormenores de ligação entre as paredes, o pilar com a alma perpendicular às mesmas e o pórtico a) rasgos para posterior ancoragem da parede à coluna de teste b) ligação pilar – parede c) ancoragem da ligação pilar – parede

A ação térmica foi aplicada utilizando um forno elétrico, figura 3.9 a) e b), capaz de seguir aproximadamente à curva de incêndio padrão, ISO 834. O forno foi colocado de um lado do provete (pilar e parede) a ensaiar, permitindo a aplicação de um elevado gradiente térmico na direção perpendicular à parede.

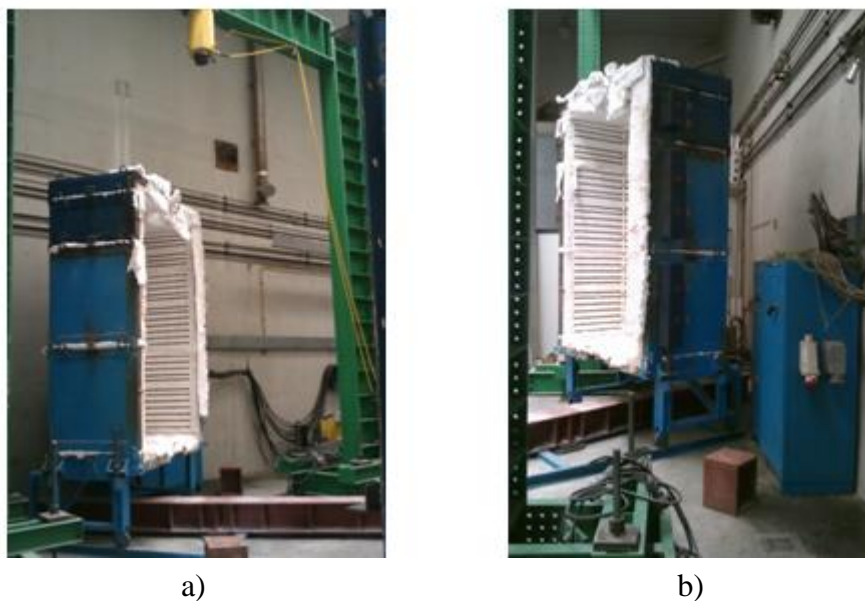


Figura 3.9 - Posicionamento do forno na instalação experimental a) vista lateral, lado esquerdo b) vista lateral, lado direito, (Correia, Rodrigues e Silva (2009 a,b))

O forno era composto por vários módulos, apoiados sobre um *charriot*, dispositivo com rodas, que permitia de uma forma simples a movimentação do posicionamento do mesmo.

Para os ensaios efetuados na presente dissertação, o forno tinha dimensões interiores de 1.50x1.50x2.50 m, sendo o mesmo modular permite diferentes dimensões interiores.

Apenas um dos lados de cada módulo será utilizado no aquecimento dos pilares inseridos em paredes, como se pode observar, por exemplo, na figura 3.7 b), uma vez que se tem interesse em analisar o gradiente térmico não uniforme.

A vedação do forno foi efetuada maioritariamente pelas paredes, nas restantes frestas utilizaram-se mantas cerâmicas.

Todos os valores mencionados foram medidos e registados por um *DATA LOGGER TDS – 30* com duas caixas adicionais, modelo SSW-50D. Este sistema é capaz da aquisição de 80 canais para a medição das diferentes grandezas obtidas nos ensaios ao longo do tempo de teste (figura 3.10 a)). Para o controlo das forças aplicadas pelo macaco hidráulico, foi utilizada uma central servo-hidráulica (figura 3.10 b)). Os valores de temperatura e deslocamento iam sendo observados no visor do *DATA LOGGER* (figura 3.11).



a)



b)

Figura 3.10 - Equipamento de apoio aos ensaios a) *data logger* b) central servo-hidráulica de controle do macaco hidráulico



Figura 3.11 - Representação visual instantânea de alguns resultados durante o ensaio

3.3. Provetes de ensaio

Os ensaios experimentais consistiram na construção de três provetes de ensaio. Dois diferenciando-se entre si na orientação da secção transversal, em relação à face da parede de alvenaria e um terceiro ensaio feito ao pilar HEA 100 isolado.

A construção dos provetes de ensaio envolveu a utilização de três perfis metálicos HEA 100 (figura 3.12 a)), com 2940 mm de comprimento em aço S355 (figura 3.12 b)), tendo sido soldadas no topo e na base, chapas de aço com dimensões de 450x450x30 mm, igualmente em aço S355. Para que se pudessem efetuar medições de temperaturas ao longo dos pilares, em diferentes secções, foram soldados termopares tipo K (Cromo-Níquel-Alumínio), com diâmetro de 0,5 mm, por secção, de acordo com o apresentado na figura 3.13 a).

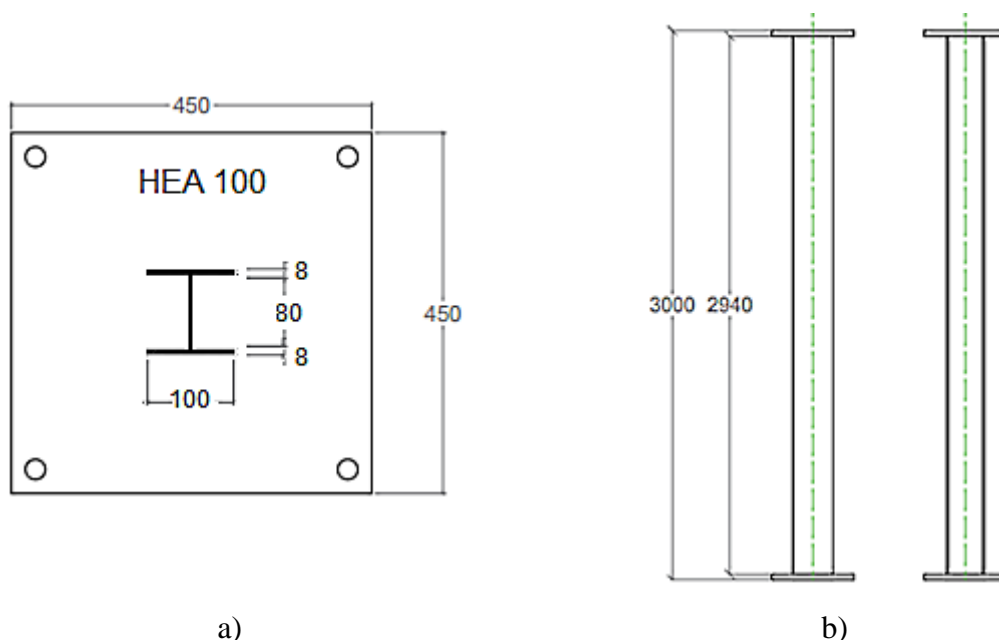


Figura 3.12 - a) Secção transversal do pilar metálico em conjunto com as chapas de topo soldada b) Altura do pilar

A divisão do pilar de ensaio em secções pode ser observada na figura 3.13 a).

Na figura 3.13 b), identifica-se a secção transversal com a alma perpendicular, enquanto que, a caracterização da alma paralela em relação à face da parede de alvenaria, se efetua na figura 3.13 c). Para além e, como já referido, se ter igualmente realizado o estudo do pilar isolado sujeito à ação do fogo.

As figuras 3.13 b) e c) permitem ainda a visualização do posicionamento dos termopares medidores de temperatura.

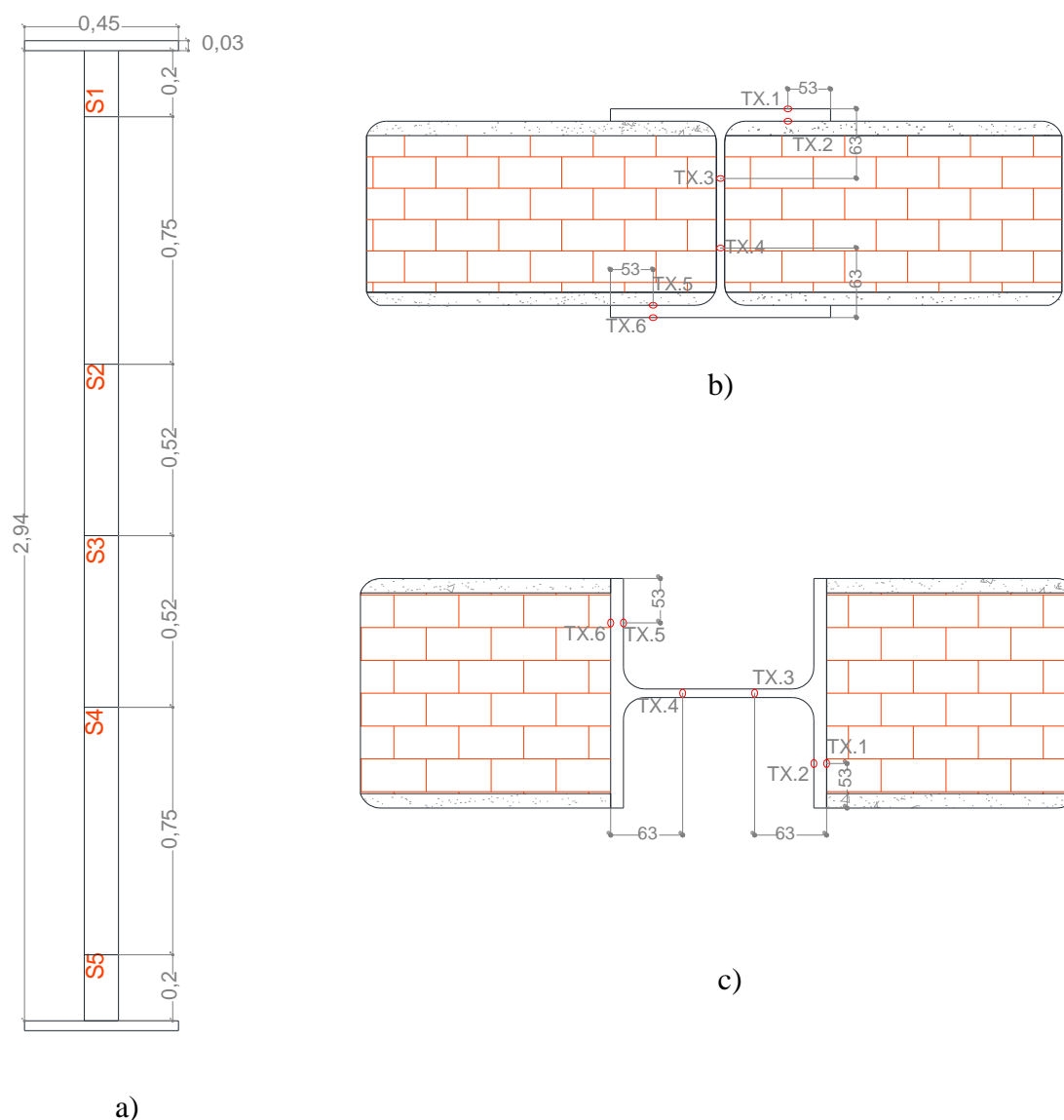


Figura 3.13 - Provetes de ensaio com localização dos termopares a) vista lateral b) secção transversal com perfil tendo a alma perpendicular à parede c) secção transversal com perfil tendo a alma paralela à parede

Os termopares utilizados tinham a capacidade de fazer leitura de temperaturas até 1200°C.

De acordo com o observado a partir da figura 3.7 c) e figura 3.8 c), um dos primeiros procedimentos foi a colocação dos termopares no pilar, para tal, procedeu-se à rebarbagem do local onde se soldaram os termopares, para que durante o período de ensaio se minimizasse o destacamento dos mesmos da superfície do pilar, possibilitando assim, uma melhor fixação. Depois disso colocou-se a coluna metálica no centro do pórtico de ensaio, já com as chapas soldadas na base e no topo.

Para a construção das paredes, executadas separadamente do esquema de ensaio, foi projetado um quadro metálico composto por perfis do tipo UPN160, figura 3.14 b).

Iniciou-se a construção das mesmas em cima do quadro metálico em formato L, até à altura total necessária de 2940 mm, em seguida, colocou-se outro perfil UPN na face superior da parede e ligado ao resto do quadro por meio de varões *dywidag* A900/1000 de 20 mm de diâmetro e 3,5 m de comprimento. Utilizaram-se tijolos cerâmicos furados, de dimensões 30x20x7 mm, as juntas foram executadas com uma argamassa de assentamento, constituída por areia e cimento ao traço 3:1.

Foram ainda soldados ganchos metálicos (ancoragens) feitos a partir de varões de ferro de 8 mm de diâmetro em lados opostos dos perfis metálicos, dependendo da orientação do perfil em análise. Colocaram-se cinco ganchos em cada lado do pilar, para garantir a fixação das paredes nos pilares. Na figura 3.14 a) são indicadas as secções nas quais foram soldados os ganchos de ancoragem ao pilar de ensaio.

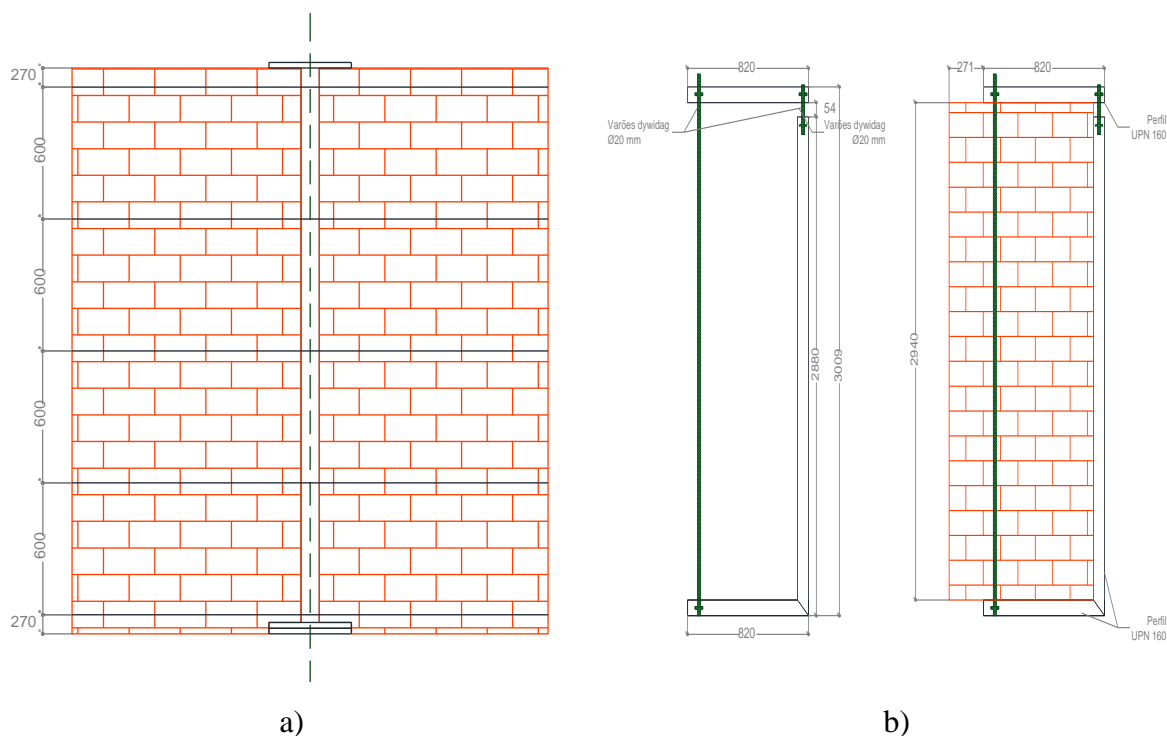


Figura 3.14 - a) Posicionamento dos ganchos para ancoragem da parede b) Detalhe do quadro onde foram executadas as paredes

O acabamento das paredes de alvenaria foi feito aplicando-se em ambas as faces uma camada de reboco de aproximadamente 1,50cm de espessura em argamassa de cimento e areia ao traço 1:3.

As paredes foram posteriormente transportadas para o pórtilco de ensaio com auxílio da ponte rolante, deixando-se os ganchos metálicos que posteriormente foram tapados e ancorados às paredes, tanto para o caso da alma perpendicular como paralela, com argamassa de características iguais à argamassa de assentamento.

Importa ressaltar que o carregamento aplicado em cada um dos ensaios foi realizado em função do fator de carga e da resistência à temperatura ambiente definida pelo Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010).

A capacidade de carga do pilar HEA 100, à temperatura ambiente é apresentada no quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Capacidade de carga do pilar HEA 100 à temperatura ambiente

PERFIL	N_{Rd} [kN]	Esbelteza λ
HEA 100 com a alma paralela à parede	366,4	83,7
HEA 100 com a alma perpendicular à parede	599,4	51,7

No quadro 3.2 é apresentado em detalhe os casos que foram contemplados no programa experimental, em conjunto com as variáveis de interesse em cada um deles.

Quadro 3.2 - Detalhe dos provetes do programa experimental

Referência	Perfil HEA	Orientação da alma	Espessura da Parede	Fator de Carga	Carregamento Aplicado [kN]	Na Figura 3.4
H100-ISO-FC60	100	-	-	60%	218	-
H100-PAR-E10-FC60	100	Paralela	10 cm	60%	218	A
H100-ORT-E10-FC30	100	Ortogonal	10 cm	30%	158	B

Na figura 3.15, apresentam-se as secções transversais analisadas.

No caso A apresenta-se o pilar metálico perpendicular à parede de alvenaria, assim como, as ancoragens à parede e o posicionamento de fogo.

No caso B apresenta-se o pilar metálico paralelo à parede de alvenaria, assim como, as ancoragens à parede e o posicionamento de fogo.

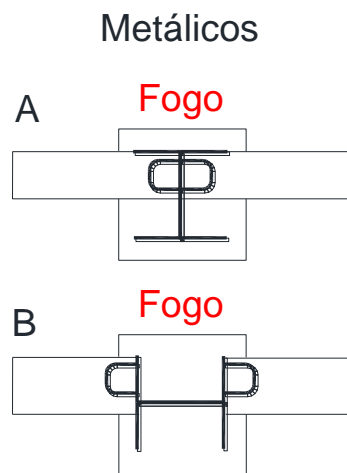


Figura 3.15 - Casos analisados no programa experimental

As figuras 3.16 a) e b) possibilitam visualizar o pilar HEA100 quando estava pronto para o ensaio isoladamente, ou seja, sem as paredes.



a)



b)

Figura 3.16 - Colocação do pilar HEA 100 no pórtico de restrição para o ensaio isolado a) vista lateral do pilar b) vista lateral – localização dos termopares

As figuras 3.17 a) e b) mostram a construção dos provetes, pilar com a alma paralela à parede e pilar com a alma perpendicular à parede, respetivamente.



a)



b)

Figura 3.17 - Colocação das paredes de alvenaria no pórtico de restrição para ambos os ensaios a) vista lateral – pilar com a alma paralela à parede b) vista frontal – pilar com a alma perpendicular à parede

As figuras 3.18 a) e b) possibilitam a visualização das paredes de alvenaria no pórtico de restrição, pilar com a alma paralela à parede e pilar com a alma perpendicular à parede, respetivamente.



a)



b)

Figura 3.18 - Paredes de alvenaria no pórtico de restrição para ambos os ensaios a) vista lateral – pilar com a alma paralela à parede, antes da colocação do forno b) vista lateral – pilar com a alma perpendicular à parede, após a colocação do forno

No anexo II, pode visualizar-se o desenvolvimento fotográfico, mais pormenorizado, realizado ao longo da preparação dos provetes de ensaio.

3.4. Procedimento de Ensaio

Após a montagem da instalação experimental, seguiram-se os passos de procedimento, apresentados seguidamente:

1. Ligação e programação do *Data logger*, definindo todos os canais do sistema, bem como a ligação ao macaco hidráulico e ao forno, para que assim pudessem ser efetuados todos os registos de dados durante o ensaio e com o propósito de se acompanhar o comportamento de algumas variáveis durante o mesmo;
2. Programação do forno elétrico para a curva de incêndio padrão, ISO 834;
3. Programação da central servo-hidráulica para se proceder à aplicação da carga pretendida durante o ensaio;
4. Aplicação da carga de serviço ao provete, que foi mantida constante durante todo o procedimento de ensaio. Para que a carga fosse totalmente transmitida ao pilar a ensaiar, foram sendo libertadas as porcas dos varões roscados que faziam a ligação entre as vigas superiores e os pilares do pórtico de restrição;
5. Quando foi certo que a carga se encontrava totalmente aplicada ao pilar (30% e 60% do valor de cálculo da carga da encurvadura do pilar à temperatura ambiente, para o caso da alma perpendicular e paralela à parede, respetivamente) procedeu-se ao aperto das porcas dos varões roscados, tendo em mente que o objetivo disso era a materialização do efeito de restrição à dilatação térmica dos mesmos;
6. A última ação deste procedimento culminou no início do ensaio com a aplicação da ação térmica, através do forno elétrico.

3.5. Resultados

Concluídos os ensaios experimentais, seguiu-se a análise rigorosa dos resultados, a fim de se proceder à avaliação da evolução de temperaturas, deslocamentos axiais e laterais, assim como das forças de restrição axiais, para os três tipos de provetes ensaiados.

3.5.1. Temperaturas

A evolução da média das temperaturas dos módulos (três) do forno, e a relação existente com a curva de incêndio padrão, ISO 834, ao longo do tempo reproduzem-se nos gráficos 3.1 e 3.2 a) e b).

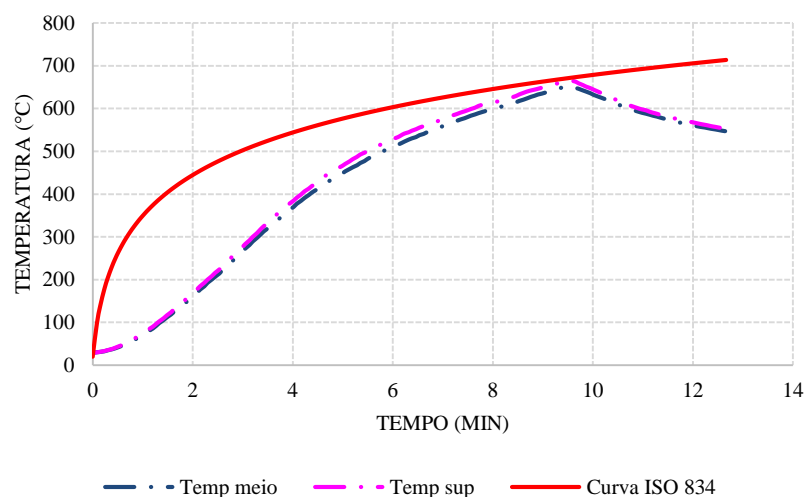


Gráfico 3.1 - Temperatura média nos vários módulos do forno e curva de incêndio padrão, ISO 834, para o ensaio do pilar isolado

Da análise dos gráficos seguintes (gráfico 3.1 e 3.2), verifica-se que o comportamento nos diferentes módulos do forno é muito semelhante, garantindo uma distribuição de temperaturas uniforme ao longo da altura do provete de ensaio. É ainda possível comparar as diferenças de evolução de temperaturas, relativas ao forno e à curva de incêndio padrão, ISO 834. Essa diferença deve-se às dimensões do forno, pois com dimensões tão grandes existe maior probabilidade de perdas de calor e de potência, fazendo com que o mesmo não acompanhe a curva de incêndio padrão. No gráfico 3.1, ensaio com pilar isolado, nota-se uma maior discrepância, explicada também pelo facto da existência de maior espaço livre e por isso maiores perdas de calor para o exterior.

Será por isso importante mencionar que para fornos de menores dimensões, e principalmente para os que utilizam como combustível o gás, os efeitos referidos poderiam não se verificar.

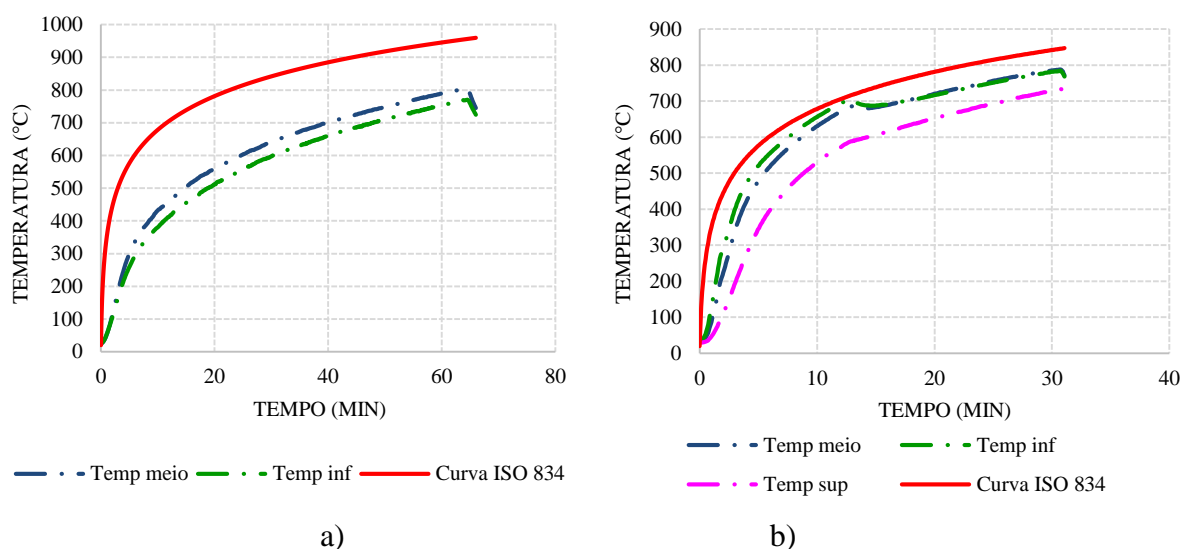


Gráfico 3.2 – Temperatura média nos vários modelos do forno e curva ISO 834 a) para o caso do pilar com a alma paralela à parede b) para o caso do pilar com a alma perpendicular à parede

De mencionar que nos três ensaios foram colocados termopares medidores de temperatura por cada módulo do forno, sendo que no caso do pilar isolado se perdeu o termopar inferior e no caso do pilar com a alma paralela às paredes o termopar superior, tendo esse fato sido considerado no cálculo das temperaturas médias.

Na simulação numérica, a diferença de evolução de temperaturas foi tida em conta, pois a ação térmica aplicada na mesma, baseou-se nas temperaturas efetivamente medidas no interior do forno, durante o ensaio, usando-se as mesmas como forma de calibração dos ensaios numéricos.

Nos gráficos 3.3 e 3.4 a) e b), são apresentadas as evoluções das temperaturas médias por secção, ao longo da altura do pilar, para o caso em que foi realizado o ensaio do pilar isolado, pilar com a alma paralela à parede e pilar com a alma perpendicular à parede, respetivamente.

De uma forma geral, pela análise dos gráficos 3.3 e 3.4 a) e b), verifica-se a proximidade das curvas para as secções 2 e 3, temperaturas mais elevadas. No caso das secções 1 e 4, comprova-se que são as secções com as temperaturas mais reduzidas, dado a sua menor exposição por estarem nos extremos do pilar que se encontravam amarrados exteriormente à zona de ação do forno. Comparativamente às diferentes disposições da parede de alvenaria, concluiu-se que para o caso da alma paralela, as temperaturas atingidas, são mais elevadas do que para o caso da alma perpendicular à parede, devendo-se tal facto à maior área de exposição do elemento metálico ao fogo.

Por falhas laboratoriais, os termopares colocados na secção 5, perderam-se no decorrer dos ensaios, para os três casos de estudo. Uma das explicações poderá passar pelo facto de estar numa zona de extremos do pilar, onde se força bastante aquando da colocação do forno; outra poderá estar relacionada com o processo de colocação dos mesmos, onde a aderência da secção metálica – solda – termopar, não terá sido a mais adequada.

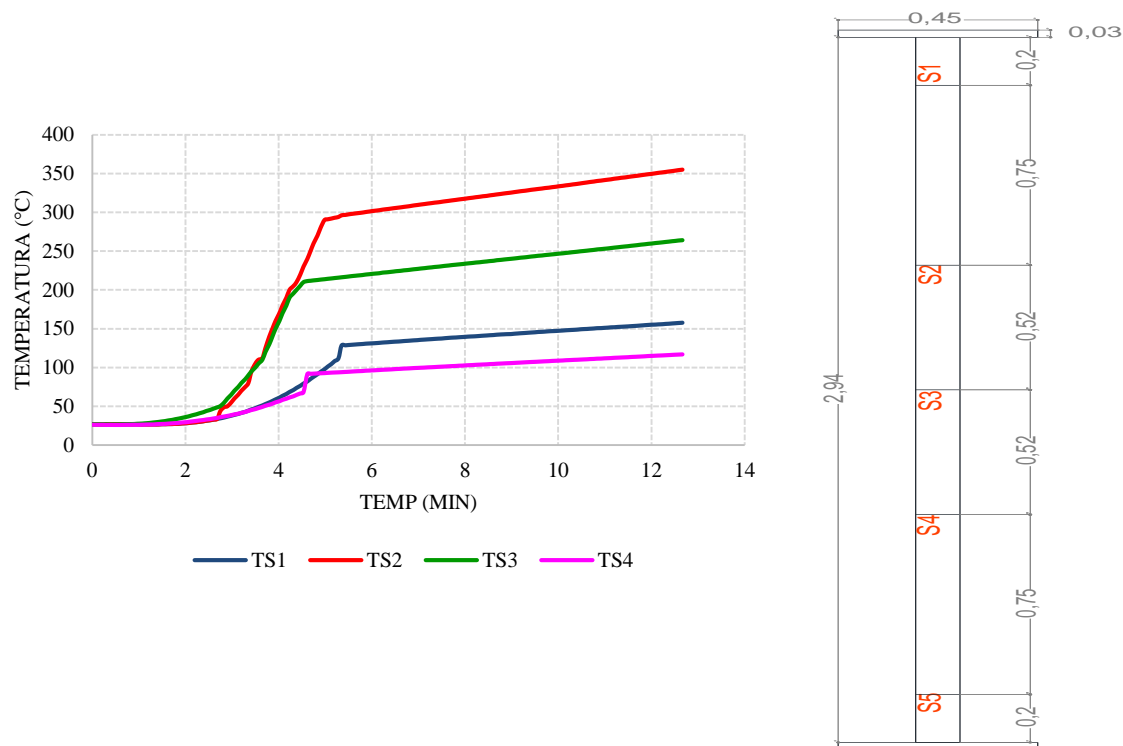


Gráfico 3.3 - Temperatura média por secções – caso do pilar isolado

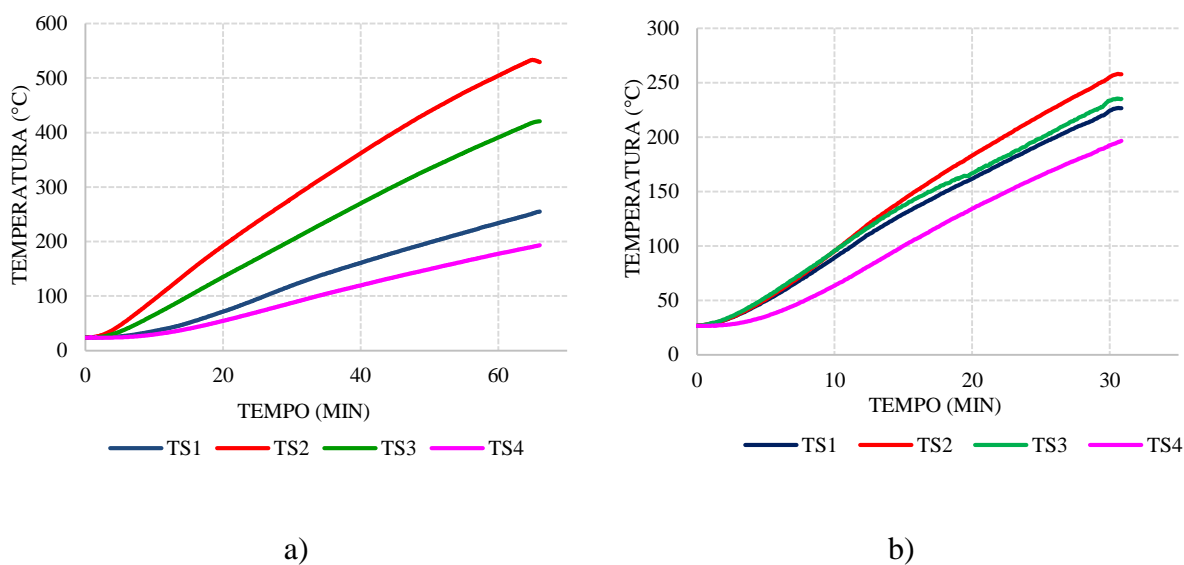


Gráfico 3.4 - Temperatura média por secções a) caso do pilar com a alma paralela à parede b) caso do pilar com a alma perpendicular à parede

No anexo IV, apresenta-se o estudo da evolução das temperaturas a meia altura para o caso do pilar com a alma paralela à parede, sujeito a 60% do valor de carregamento, para as diferentes secções analisadas (S1, S2, S3, S4 e S5), embora como se pode observar pelos gráficos expostos perdeu-se o termopar da secção 5 e na análise da secção 3 perdeu-se também o termopar referente à secção 3.

O anexo V, contempla o estudo da evolução das temperaturas a meia altura para o caso do pilar com a alma perpendicular à parede, sujeito a 30% do valor de carregamento, para as diferentes secções analisadas (S1, S2, S3, S4 e S5), embora como se pode observar pelos gráficos expostos perdeu-se o termopar da secção 5, de forma idêntica ao caso do pilar com a alma paralela à parede.

3.5.2. Forças de restrição

No gráfico 3.5 são apresentadas, para os três casos de estudo, a evolução das forças de restrição em função do tempo.

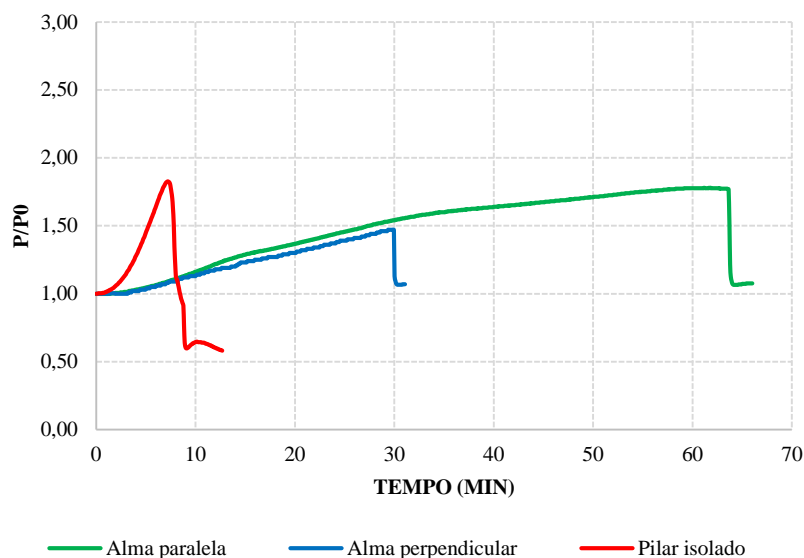


Gráfico 3.5 - Evolução das forças de restrição ao longo do tempo

Os valores da carga são relativos às cargas iniciais aplicadas em cada pilar. No caso do ensaio, perfil isolado sujeito à ação do fogo o aumento relativamente ao início (estado das forças de restrição do pilar à temperatura ambiente) é de 80%, para o caso do pilar com a alma perpendicular à parede, o aumento de esforço axial relativamente ao inicial foi cerca de 50%, enquanto que para o caso do perfil com a alma paralela à parede esse aumento foi de 70%.

Na análise do gráfico 3.5, observa-se um aumento do valor das forças de restrição em cerca de 20% mais no caso do perfil com a alma paralela do que no caso da alma perpendicular à parede. Pode justificar-se o aumento observado pela maior exposição ao fogo do pilar com a alma paralela à parede, provocando um maior alongamento térmico no mesmo, levando ao aumento das forças de restrição. Pode concluir-se que para o caso dos pilares inseridos em paredes de alvenaria, quanto maior a exposição da secção ao fogo, maior valor tomarão as forças de restrição.

Considerando que um dos critérios de colapso do pilar pode ser o instante em que o esforço axial após sofrer aumento desce até ao valor inicial. Observando o gráfico, pode visualiza-se que o pilar isolado perde a sua estabilidade ao fim de 10 minutos, o pilar com a alma

perpendicular à parede ao fim de 30 minutos e o pilar com a alma paralela à parede ao fim de aproximadamente 65 minutos.

3.5.3 Deslocamentos

Nesta secção são apresentados os resultados dos deslocamentos axiais e laterais obtidos nos ensaios experimentais. Com a análise dos deslocamentos laterais tornou-se possível a observação de “*Thermal Bowing*”, fenómeno que tem sido descrito ao longo deste estudo, provocado pelo aquecimento diferencial das secções, gerando uma inversão dos momentos fletores.

A diferença dos deslocamentos laterais observada para as duas situações de ensaio com paredes é visível na análise dos gráficos 3.6 a) e b).

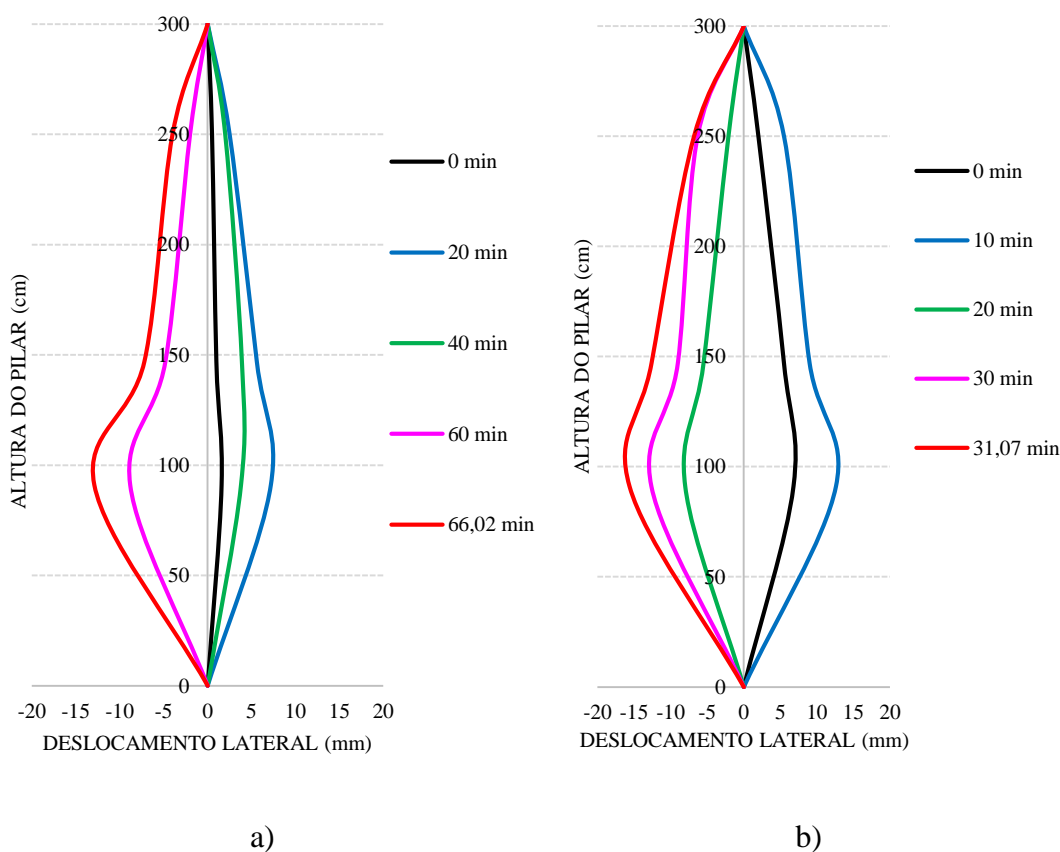


Gráfico 3.6 - Deslocamento lateral a) alma paralela à parede b) alma perpendicular à parede

Numa fase inicial o deslocamento do pilar seguiu a direção do fogo, bem como o sentido da face aquecida e posteriormente inverteu e seguiu o sentido oposto. Os deslocamentos são maiores no caso em que a alma do perfil se encontra perpendicular à parede de alvenaria, tal fator é justificado pelo maior gradiente térmico verificado no caso da alma perpendicular, pois estando o pilar mais “protegido” pela parede, induziu uma maior diferença de temperatura entre a parte exposta e não exposta à ação do fogo, o que já não se verifica para o caso em que a alma o perfil se encontra paralela à parede, onde a maior exposição ao fogo da secção transversal conduziu à uniformização da temperatura nessa secção.

Importa referir que os deslocamentos verificados aos zero minutos, mais relevantes para o caso do pilar com a alma perpendicular à parede, se devem às imperfeições geométricas.

No gráfico 3.7 pode observar-se os deslocamentos verticais registados para os casos de estudo mencionados anteriormente, incluindo para o ensaio do pilar isolado.

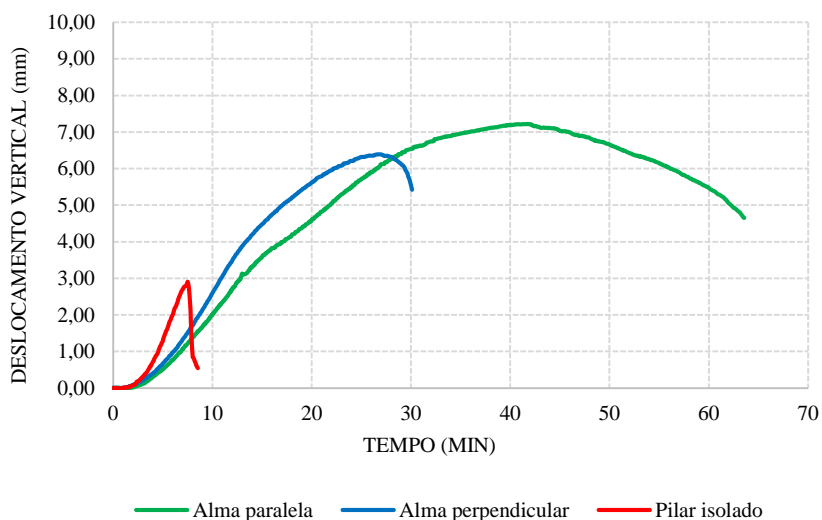


Gráfico 3.7 - Deslocamentos verticais dos pilares com a alma paralela, com a alma perpendicular à parede de alvenaria e isolado

Para apresentar de forma mais elucidativa os resultados dos ensaios experimentais foram efetuadas algumas fotografias dos provetes, que se apresentam nas figuras 3.19 e 3.20.

Na figura 3.19, pode visualizar-se o pilar isolado a) no início do ensaio b) no final do ensaio.

Na figura 3.19 b), é possível observar, no final do ensaio, o deslocamento do pilar isolado, para o lado contrário ao fogo, i.e, lado não aquecido.



a)



b)

Figura 3.19 - Pilar isolado a) antes do ensaio b) no final do ensaio

Na figura 3.20 a), começa a notar-se o aquecimento da parede de alvenaria, zona alaranjada, antes da fissuração das paredes (figura 3.20 b)).



a)



b)

Figura 3.20 - Deformada após ensaio do pilar no caso da alma perpendicular à parede a) vista lateral antes da fissuração das paredes b) vista frontal depois da fissuração das paredes

Foram ainda durante o ensaio observados outros fenómenos, impossíveis de registar fotograficamente devido ao perigo pela proximidade que apresentavam, como a observação da superfície da alma do pilar incandescente, fenómeno naturalmente apenas observado para o caso de estudo com a alma paralela à parede. Para o mesmo caso é possível na figura 3.21 a) visualizar as resistências incandescentes no interior do forno, devido às fissuras que se foram abrindo na parede de alvenaria. Na figura 3.21 b) pode observar-se a formação de uma “barriga” no provete de ensaio.



a)



b)

Figura 3.21 - Provete durante o ensaio, caso com a alma paralela à parede a) vista frontal, são visíveis através das fissurações as resistências do forno b) vista lateral do provete, denota-se a formação da “barriga” da deformada

Para o caso em que a coluna de ensaio tem a alma perpendicular à parede, figura 3.22 a) e b), pode visualizar-se as fissuras que foram aparecendo na parede de alvenaria ao longo do período de ensaio, observa-se a dominância da fissuração vertical, evidente na figura 3.22 b), explicada pela deformada que o perfil apresenta com o aquecimento e com a restrição axial.



a)



b)

Figura 3.22 – Provete de ensaio com a alma perpendicular à parede a) antes do ensaio b) após o ensaio, onde se podem observar as fissuras das paredes e a deformada do pilar

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA

As simulações numéricas têm como principal objetivo representar os fenómenos reais com a maior exatidão possível. No âmbito deste capítulo pretendeu-se uma simulação dos ensaios experimentais realizados e descritos no capítulo 3.

No desenvolver do presente capítulo apresentar-se-á uma descrição do programa ABAQUS, assim como, das suas funcionalidades, com as quais foi possível a realização das simulações numéricas. Todas as soluções e opções relativas aos modelos numéricos serão devidamente descritas e justificadas. Poderá também encontrar-se a comparação dos resultados experimentais com os numéricos.

4.1. Condições Gerais

Os métodos avançados de cálculo são uma ferramenta de trabalho eficaz, na análise térmica e mecânica de estruturas em situação de incêndio. No presente documento descreve-se a modelação numérica dos ensaios experimentais com recurso ao programa de elementos finitos ABAQUS versão 6.13-1.

O *software* de estudo é constituído essencialmente por dois módulos, o módulo um que trata a parte gráfica - ABAQUS/CAE - e o módulo dois designado por “*solver*” - ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit.

O pré-processador ABAQUS/CAE constitui uma interface gráfica deste *software*, gerindo assim a introdução de dados do utilizador relativamente à geometria do problema, propriedades dos diferentes tipos de materiais, condições de contorno e aplicações dos diferentes níveis de carregamento. Todos estes passos encontram-se divididos por etapas no programa, permitindo uma rápida e eficiente introdução e definição do problema.

O módulo “*Part*” serve para a definição e verificação da geometria das várias partes constituintes do modelo. O módulo “*Property*” permite introduzir as propriedades mecânicas dos materiais utilizados no modelo. O módulo “*Assembly*” permite definir as diferentes posições que cada elemento vai assumir, uns relativamente aos outros, ou seja, permite fazer a montagem do modelo, partindo das suas diferentes partes. O módulo “*Step*” permite definir a sequência das etapas de análise, podendo ser alteradas as condições de apoio, ações térmicas e mecânicas em cada passo. O módulo “*Load*” serve para definir as condições de contorno e natureza das diferentes cargas, incluindo a ação do peso próprio e temperatura ambiente inicial. O módulo “*Mesh*” permite ao utilizador a geração de uma malha de elementos finitos para cada parte do modelo. Por fim, o módulo “*Job*” é usado para permitir gerir a análise de todo o modelo.

Após a definição e construção do modelo, seguiu-se a simulação pelo método de elementos finitos recorrendo ao ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit. O ABAQUS/Standard efetua o processo de análise capaz de resolver um elevado número de problemas lineares e não lineares, envolvendo processos estáticos, dinâmicos ou térmicos, utilizando um esquema de equações implícitas em cada incremento. O ABAQUS/Explicit está direcionado para a resolução de problemas dinâmicos ou problemas que envolvam uma mudança das condições de fronteira dado que recorre a um sistema de integração explícito.

O ABAQUS/pós-processador, parte integrante do *software*, permite uma distinta análise e interpretação dos diferentes resultados do modelo numérico em causa.

4.2. Modulação numérica com o programa ABAQUS

Conforme mencionado nas considerações gerais deste capítulo, o *software* de cálculo ABAQUS integra vários módulos, seguidamente descritos de forma detalhada.

“Part Module”

O “Part Module” inicia a formação do modelo numérico, com a criação das partes constituintes, definindo e guardando as características geométricas de todas as partes. Cada parte constituinte do modelo guarda na forma de uma lista ordenada de recursos, onde os parâmetros que definem cada recurso, combinados definem a geometria da peça. Para além de criar, este módulo permite editar e gerir as partes do modelo.

Resumindo o “Part Module” utiliza-se para criar, editar e gerenciar as partes do modelo.

Na figura 4.1 mostra-se duas partes a) pilar e b) parede.

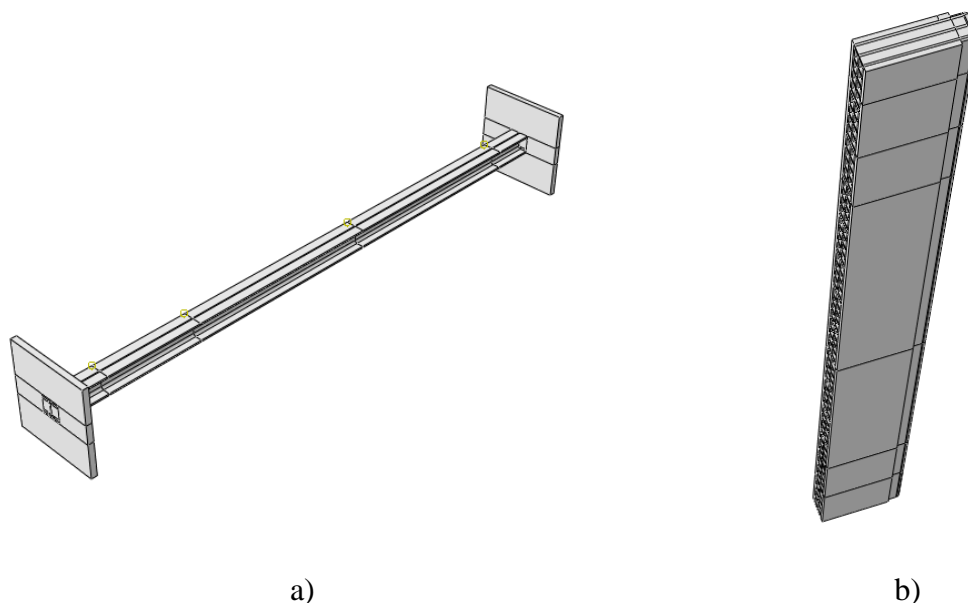


Figura 4.1 - Definição das partes do modelo no módulo "Part" a) pilar b) parede

“Property Module”

Neste módulo são criados os vários materiais e definidas as características mecânicas e térmicas em função da temperatura. Assim, como o módulo anterior, permite editar e gerir as propriedades dos materiais utilizados no modelo.

“Assembly Module”

Este módulo permite efetuar a montagem de todas as partes constituintes do modelo (figura 4.2 a) e b)). Após a criação de uma parte, este atribui-lhe um próprio sistema de coordenadas, independentemente das restantes partes do modelo. Ora, cada modelo apenas tem um e só um conjunto de coordenadas global de todas as partes constituintes. O módulo “Assembly”, permite a colocação de cada parte num determinado sistema de coordenadas global do modelo. O posicionamento de cada parte deverá ser feito por aplicação sequencial de restrições, utilizando-se a relação entre faces, arestas ou pontos, apenas por aplicação de translações ou rotações. A cada parte do modelo, associa-se uma instância que mantém a secção original da peça. Se a posição da peça sofrer alguma alteração, essa instância modifica-se, atualizando automaticamente as posições de todas as partes dependentes desta. Dessa forma, por mais partes que o modelo possua, cada modelo tem apenas uma montagem, a variação da posição das partes poderá trazer a formação de um novo modelo. A cada modelo poderão ser aplicados diferentes conjuntos de cargas, condições de fronteira, campos predefinidos e malhas.

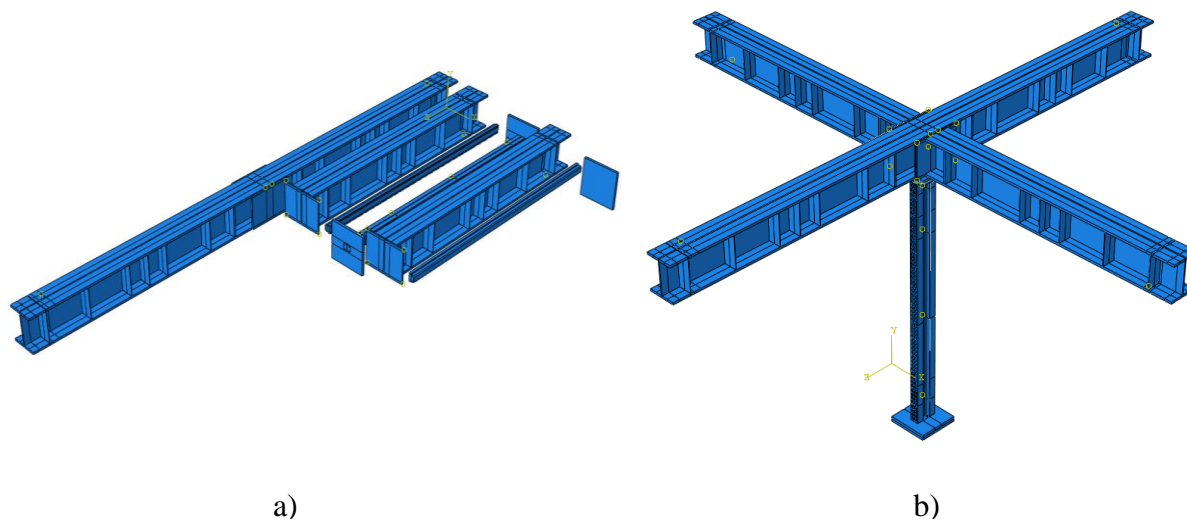


Figura 4.2 - Construção do modelo a) algumas partes colocadas lado a lado b) modelo após montagem

“Step Module”

O módulo “Step” serve para criar e definir diferentes sequências de análise. Dentro de cada modelo, possibilita criar e definir uma ou mais etapas de análise. A sequência de cada etapa permite atribuir mudanças nas variações de carga e de fronteira do modelo, diferentes interações do comportamento das peças entre si, remoção ou adição de partes constituintes do modelo e

outras alterações que podem ocorrer no seguimento da análise do mesmo. Através deste módulo pode ainda alterar-se processos de análise e saída de dados. O *software* escreve a saída de resultados a partir da análise da base de dados de saída, sendo possível ao utilizador, especificar a sua saída através da criação de pedidos, que serão gerados para análise de etapas posteriores. Após a criação do passo inicial, o ABAQUS reúne um conjunto padrão de variáveis de saída, correspondentes ao procedimento da etapa de análise. Por “*default*”, a saída solicita a cada ponto ou nó de integração, podendo ainda ser seleccionada a frequência com que as variáveis são gravadas na base de dados de saída.

“Interaction Module”

O presente módulo integra a definição das diversas interações entre partes constituintes do modelo. Permite ainda gerir essas interações nas diferentes etapas de análise.

Essas interações poderão ser de diferentes tipos:

- Interações mecânicas e térmicas entre partes do modelo ou entre uma região do modelo e a sua vizinhança;
- Restrições de análise entre regiões de um modelo;
- Características da montagem;
- Atribuição de secções tipo “*connector*” entre dois pontos de um modelo ou entre um elemento do modelo e a sua envolvente;
- Inércia para regiões do modelo;
- Fissuração em partes do modelo;
- Molas e amortecedores entre dois pontos de um modelo ou entre um ponto de um modelo e o solo.

As figuras 4.3 a) e b) possibilitam a visualização da interação convecção na parede e pilar respetivamente e a figura 4.4 mostra a interação entre *piston* e pilar.

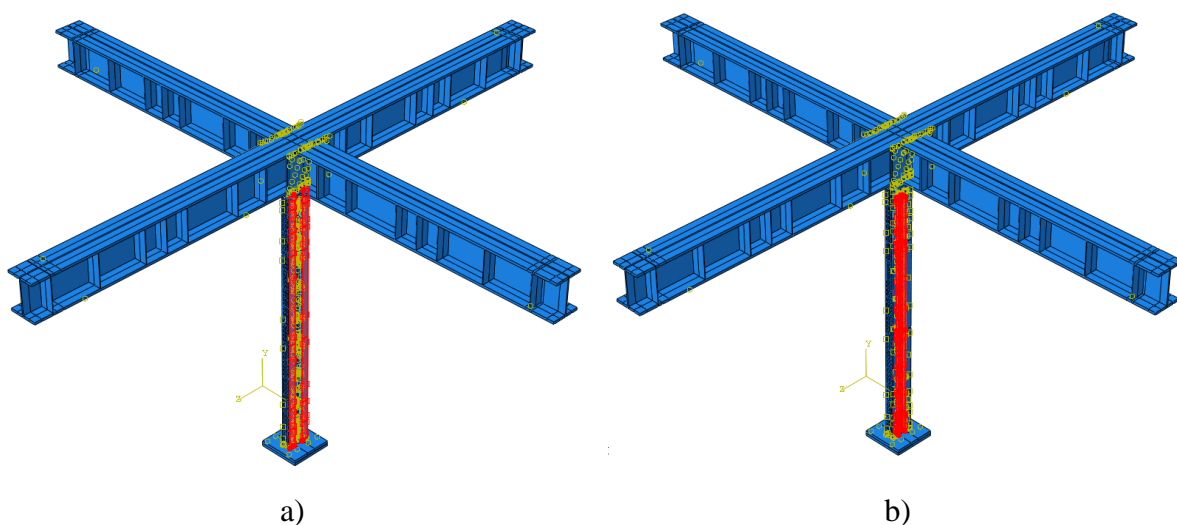
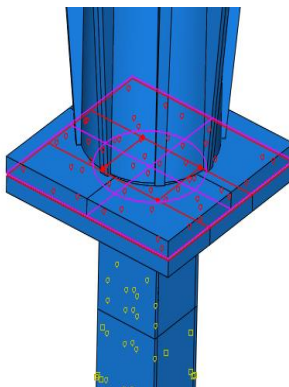


Figura 4.3 - Interação entre partes a) Convecção na parede b) Convecção no pilar

Figura 4.4 - Interação entre *piston* e pilar

Como as interações podem sofrer alterações ao longo das etapas, estas deverão ser definidas para a análise em que estão ativas.

“Load Module”

Designado módulo de carga, utiliza-se para definir e gerir condições de carregamento, contorno, campos e casos de carregamento. À semelhança de outros módulos, existe também a dependência de etapas de cálculo pelo que a atuação de “*steps*” deverá ser definida nas análises de cálculo em que estão ativos. Através do conjunto de ferramentas disponíveis neste módulo pode ainda especificar-se tempo ou dependências que poderão ser aplicadas às condições prescritas.

Na figura 4.5 a) pode observar-se a aplicação do peso próprio, a figura 4.5 b) possibilita a observação do peso próprio com o pormenor da aplicação da carga de ensaio do pilar.

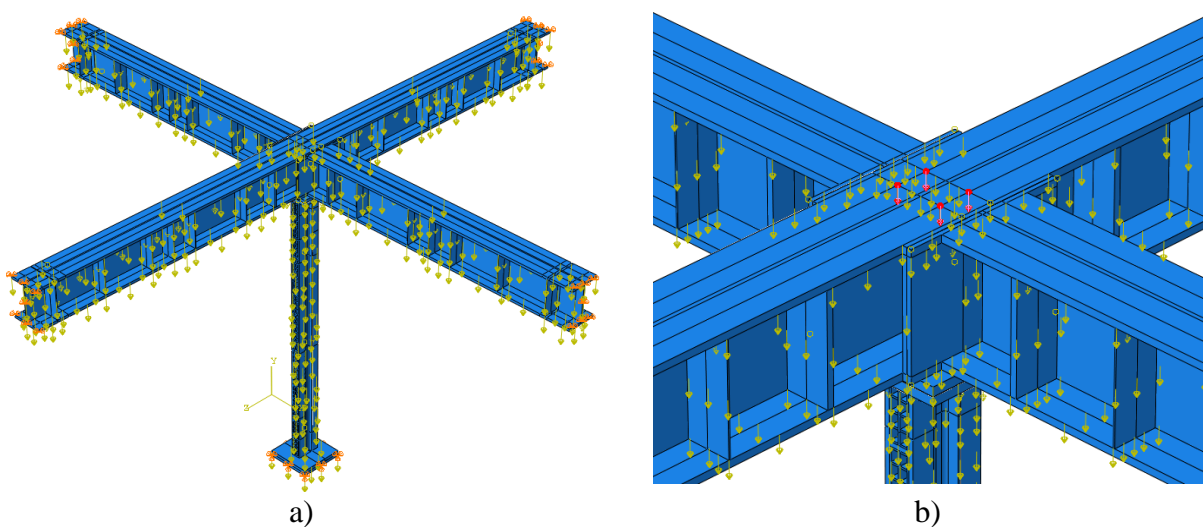


Figura 4.5 - Aplicação de carga no módulo “Load” a) aplicação do peso próprio b) aplicação da carga de ensaio do pilar e do peso próprio

“Mesh Module”

O módulo “Mesh” permite a geração de malhas de elementos finitos em elementos e montagens criados com o ABAQUS/CAE. São várias as ferramentas disponibilizadas neste módulo, permitindo especificar a densidade da malha, atribuir um controle da mesma, especificar a forma do elemento, assim como, definir diferentes malhas e diferentes modelos, ou diferentes zonas do mesmo elemento. Todos estes parâmetros podem ser modificados ao longo da criação do modelo, sendo automaticamente regenerados pelo módulo “Mesh”.

Na figura 4.6 a) pode visualizar-se a malha utilizada no pilar e na figura 4.6 b) a malha empregue na estrutura global.

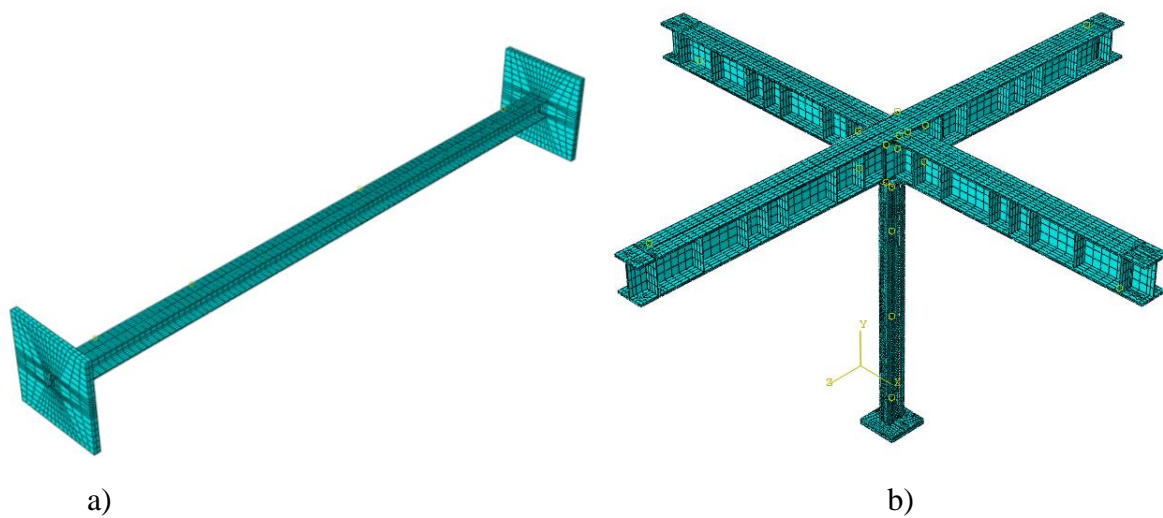


Figura 4.6 - Geração das malhas de elementos finitos no módulo “Mesh” a) no pilar b) estrutura global

“Job Module”

Após a conclusão de todo o pré-processamento do modelo de elementos finitos, com todas as informações já introduzidas no *software*, o passo seguinte realiza a análise, passo este desempenhado pelo módulo “Job”. Este módulo permite então criar um trabalho, e submeter a sua resolução ao ABAQUS/Standard ou ABAQUS/Explicit. No caso de modelos que contenham vários níveis, poderá ser feita uma análise mais complexa por etapas, precavendo por exemplo, possíveis erros que possam existir, ou simplesmente concluir, se aqueles são ou não realmente os resultados esperados ou previstos, com vista a prosseguir para as etapas seguintes. Não havendo essa necessidade, é então feita uma análise única e global do modelo. Este módulo tem potencialidades muito úteis, permitindo monitorizar e gerir todo o processo de análise, assim como, criar novos modelos e trabalhos, executando e trabalhando simultaneamente.

A figura 4.7 a) mostra a distribuição de temperaturas no final da simulação do ensaio do perfil com a alma paralela à parede, e a figura 4.7 b) mostra a distribuição de tensões axiais, no final do mesmo ensaio.

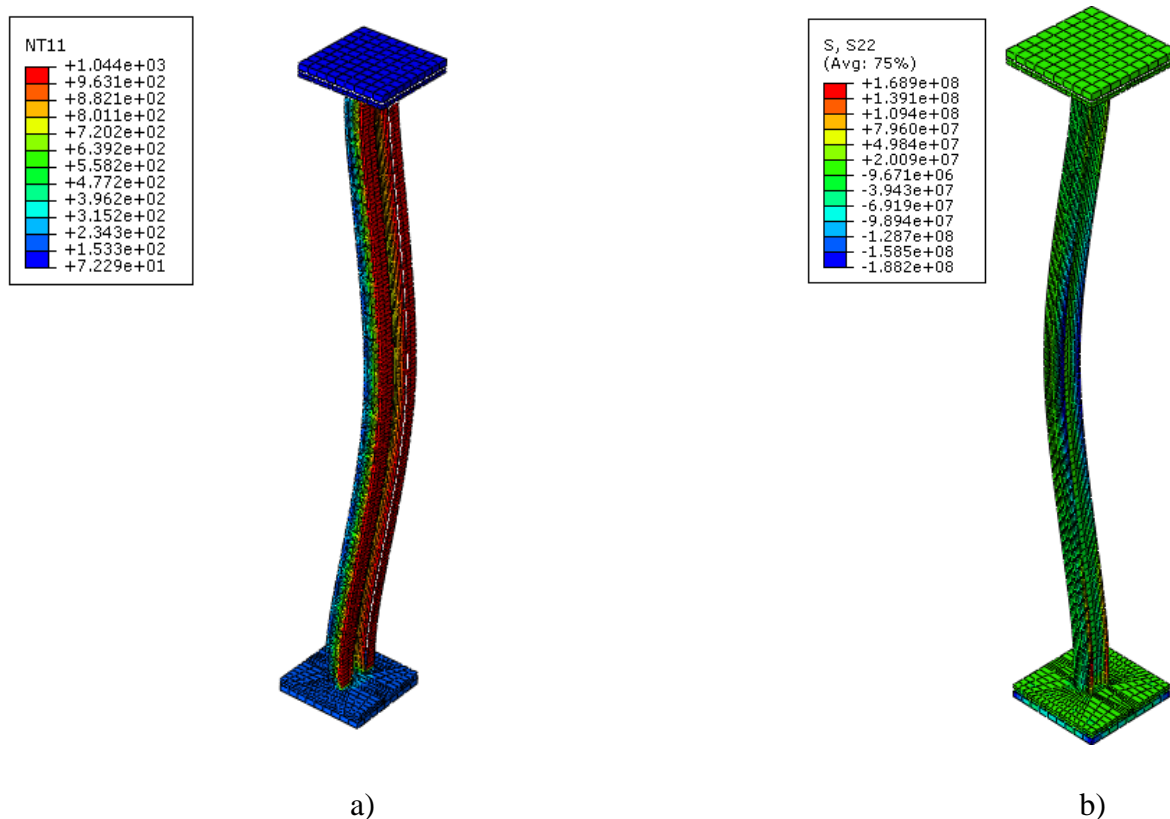


Figura 4.7 - Visualização de resultados no pilar e paredes após ensaios a) temperaturas nodais
b) tensões axiais no pilar de ensaio

No anexo VI, estão apresentadas imagens que caracterizam os diferentes procedimentos realizados para a elaboração das simulações numéricas podem, por exemplo, observar-se as Tensões de Von Mises e os deslocamentos laterais e verticais, para as simulações do pilar isolado com e sem *piston*.

Estão igualmente apresentadas no anexo VI, imagens das simulações numéricas dos ensaios experimentais e das simulações numéricas sem *piston*, para os casos dos perfis com a alma paralela e perpendicular à parede de alvenaria. Podem ainda, visualizar-se nas imagens subsequentes as temperaturas para os diferentes casos.

4.3. Modelos numéricos

4.3.1. Elementos finitos, malhas, interações e ação térmica do modelo em estudo

Os modelos numéricos pretendem ser uma réplica dos ensaios experimentais, quer da parte física de todos os elementos envolvidos quer de todas as ações. A construção dos elementos sólidos foi feita a partir da biblioteca do *software* de cálculo, onde se dispunha de várias opções para a formação de diferentes elementos finitos. Nos modelos de cálculo construídos, foram utilizados dois tipos de elementos, C3D8RT e C3D20RT, definidos como elementos hexaédricos com 8 e 20 nós, lineares, com integração reduzida de primeira ordem. Estes

elementos são caracterizados por terem pontos de integração com três graus de liberdade por nó, respeitantes às translações e rotações nas direções X, Y e Z, gerando seis componentes de tensão em cada elemento de saída. Os elementos do tipo C3D20RT foram utilizados apenas nos pilares, com dimensões aproximadas de 30mm, na restante estrutura envolvente foram utilizados elementos C3D8RT com dimensões de 50 mm (figura 4.8 b)).

Na figura 4.8 a) pode observar-se o pormenor da malha de elementos finitos no pórtico de restrição e no provete de ensaio (pillar e parede).

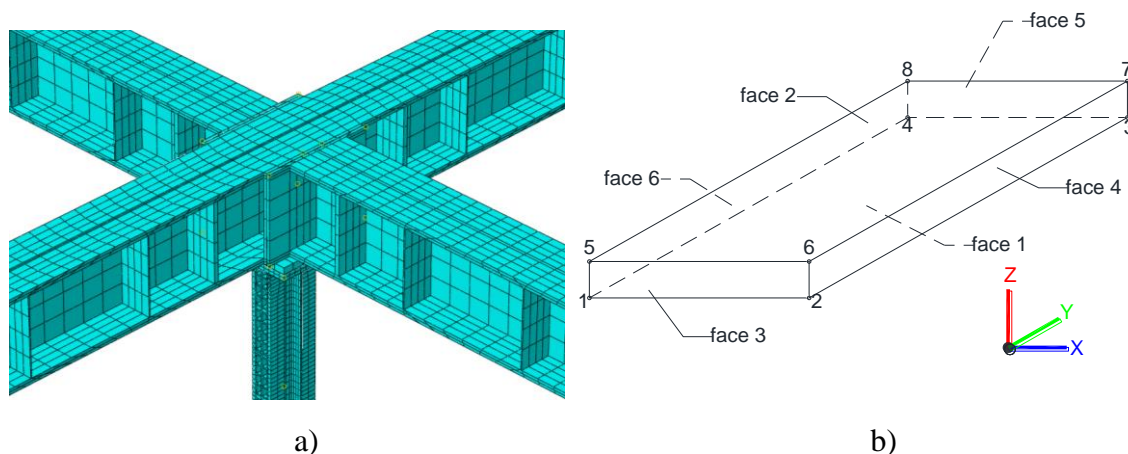


Figura 4.8 – Visualização da malha de elementos finitos a) no pórtico de restrição e provete b) detalhe do elemento finito C3D8RT

As definições das propriedades térmicas e mecânicas dos elementos constituintes do modelo adquirem um papel fundamental na aproximação à realidade. Deste modo com recurso ao Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), foram definidos os valores da condutividade térmica e calor específico em função da temperatura para os elementos de aço, sendo o peso específico do aço 7850 kg/m^3 . As propriedades da argamassa foram definidas igualmente de acordo com o Eurocódigo 4 (EN 1994:2005), considerando também a variação com a temperatura, sendo-lhe atribuído um peso específico de valor inicial 2300 kg/m^3 e um teor de humidade de 1,5%. Na modelação dos tijolos cerâmicos foi considerada uma condutividade térmica de $0,7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, um calor específico de $840 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ e uma densidade do tijolo cerâmico igual a 620 kg/m^3 .

Na aplicação da ação térmica no modelo, foram tidos em conta os diferentes mecanismos de transferência de calor, condução, convecção e radiação. No que respeita à condução, esta já foi descrita anteriormente com a definição da condutividade térmica dos diferentes tipos de materiais utilizados.

Para a transferência de calor por convecção definiu-se o coeficiente $ac = 25 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$, para a zona diretamente exposta ao fogo, não sendo diferenciado os tipos de materiais. Na zona não aquecida o coeficiente teve o valor de $9 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$.

No caso da radiação, foi considerada na zona exposta um coeficiente de emissividade $\varepsilon=0,9$. A aplicação da curva de incêndio, por forma a simular o aquecimento dos gases do meio envolvente, foi de acordo com o Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), tendo sido aplicada a curva de incêndio padrão ISO 834, exceto nas simulações de calibração dos modelos numéricos, onde foram adotadas as temperaturas registadas nos ensaios, nos vários módulos no interior do forno.

A ação mecânica foi aplicada através de uma carga dividida em quatro pontos sobre as vigas superiores com o intuito de não provocar uma deformação excessiva do banzo da viga e de forma a simular o mais próximo possível a aplicação da carga por parte do macaco hidráulico no ensaio experimental. Imperfeições geométricas foram ainda consideradas com uma excentricidade $L/1000$, entre a chapa de topo do pilar e a chapa pertencente à viga superior.

Nas simulações numéricas foi possível fazer a variação do nível de carregamento aplicado, sendo os valores utilizados iguais a 30%, 50%, 70%, 90% e 100% da carga de encurvadura dos pilares, à temperatura ambiente. A marcha de cálculo realizada para o cálculo do carregamento aplicado pode ser observada no Anexo III.

O processo de aplicação da carga realizado nos ensaios experimentais foi reproduzido nas simulações numéricas com o intuito de toda a carga aplicada, ser absorvida pelo pilar a ensaiar. Numa fase inicial não foi considerada qualquer restrição entre os varões roscados das vigas e os pilares constituintes do pórtico de restrição (figura 4.9 a)), sendo que as vigas superiores do pórtico estavam possibilitadas de se deslocarem verticalmente, como se de um “*slide*” se tratasse (figura 4.9 b)). Numa segunda fase foi considerado um encastramento entre os varões roscados e a chapa de topo dos pilares do pórtico, (figura 4.9 c) e d)).

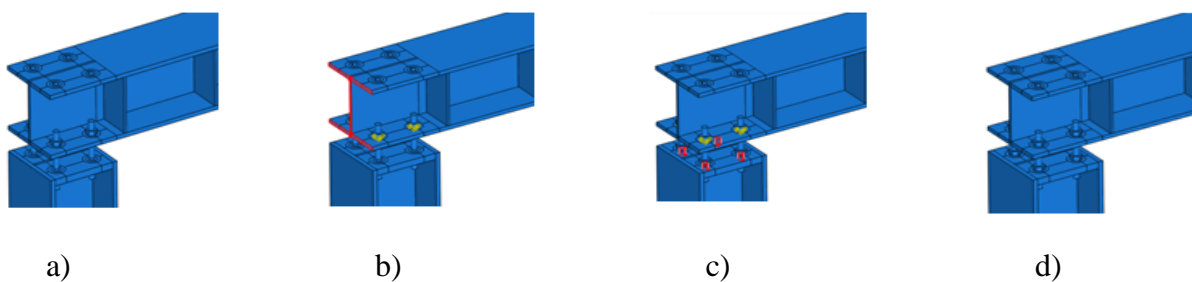


Figura 4.9 - Procedimento usado nas simulações numéricas para simular a aplicação da carga axial a aplicar sobre os pilares de aço

Nas simulações numéricas realizadas foram simuladas duas posições diferentes entre o pilar e a parede de alvenaria. Uma para o caso da posição da alma do pilar paralela à parede e uma segunda com a alma perpendicular. Deve referir-se que a espessura da parede de alvenaria foi constante em todas as simulações, com uma espessura total de 100 mm.

Na figura 4.10, pode observar-se um corte realizado a 50cm da base dos pilares, para as duas situações mencionadas, com os perfis de temperaturas obtidas após o fim das simulações, tanto nos pilares de aço, como nas paredes de alvenaria.

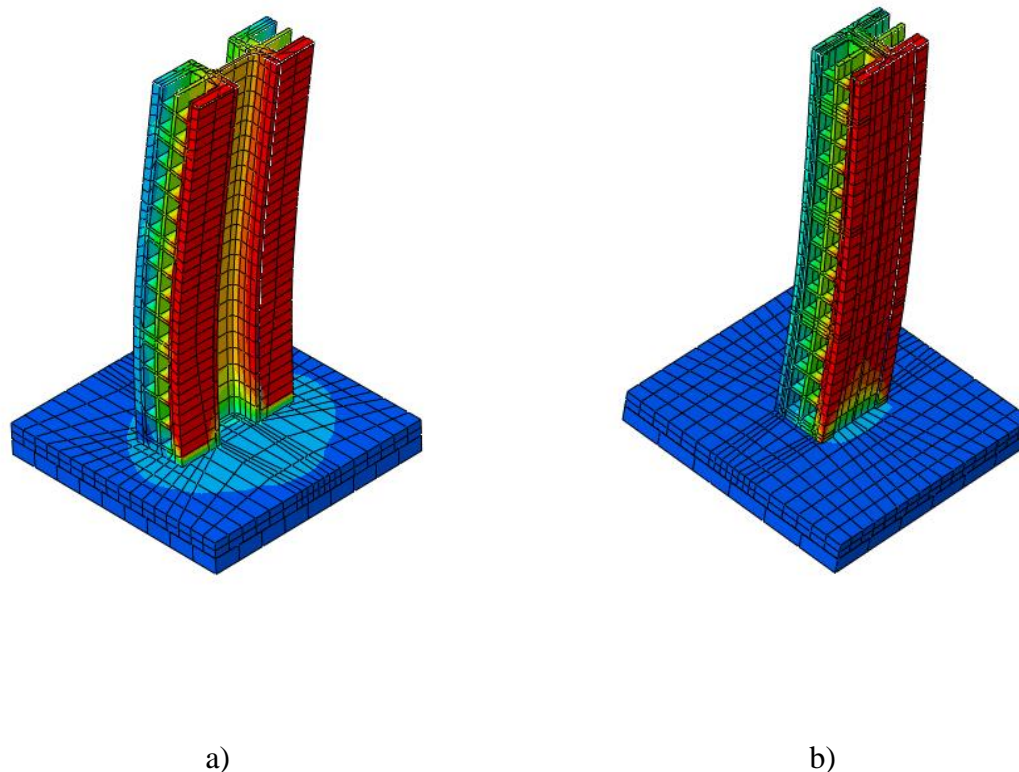


Figura 4.10 - Corte horizontal a 50 cm da base nos modelos simulados a) secção com alma paralela à parede b) secção com alma perpendicular à parede

Como mencionado no capítulo anterior o sistema experimental tinha a capacidade de simular diferentes valores de rigidez do pórtico de restrição, embora, dada a impossibilidade de realizar um elevado número de ensaios, não foi possível fazer variar os valores de rigidez da estrutura circundante nos ensaios experimentais, facto que se repetiu igualmente nas simulações numéricas com a utilização de apenas um valor de rigidez nos modelos.

Considerou-se na modelação numérica o valor de 13kN/mm, relativo à rigidez da estrutura, carregamentos de 30, 50, 70, 90 e 100% da carga de encurvadura do pilar à temperatura ambiente e variação da orientação da alma do perfil relativamente à parede de alvenaria.

Torna-se ainda relevante referir que foi feito um trabalho cuidadoso ao nível do processo de calibração realizado para os modelos, tendo sido efetuada uma análise de sensibilidades para os coeficientes de emissividade dos materiais aço e betão, experimentando-se várias combinações destes valores e escolhidos os que deram melhor aproximação com as temperaturas experimentais.

Os casos estudados nas simulações numéricas apresentam-se no quadro 4.1. Onde se pode visualizar o mesmo valor de rigidez da estrutura circundante para todos os casos, fazendo-se variar o nível de carregamento e a posição da alma relativamente à parede. Apresenta-se igualmente as condições utilizadas para as simulações relativas ao pilar isolado.

Quadro 4.1 - Casos das diferentes simulações numéricas realizadas

Ensaio	Posição da alma vs parede	Carregamento (kN/m)
PAR-k13-LL30	Paralela	109,9 (30%)
PAR-k13-LL50	Paralela	183,2 (50%)
PAR-k13-LL70	Paralela	256,5 (70%)
PAR-k13-LL90	Paralela	329,8 (90%)
PAR-k13-LL100	Paralela	366,4 (100%)
ISO-k13-LL30	Sem paredes	109,9 (30%)
ISO-k13-LL50	Sem paredes	183,2 (50%)
ISO-k13-LL70	Sem paredes	256,5 (70%)
ISO-k13-LL90	Sem paredes	329,8 (90%)
ISO-k13-LL100	Sem paredes	366,4 (100%)
PER-k13-LL30	Perpendicular	179,8 (30%)
PER-k13-LL50	Perpendicular	299,7 (50%)
PER-k13-LL70	Perpendicular	419,6 (70%)
PER-k13-LL90	Perpendicular	539,5 (90%)
PER-k13-LL100	Perpendicular	599,5 (100%)

4.4. Resultados

Este subcapítulo traduz os resultados obtidos através da análise dos modelos numéricos. Inicialmente foi feita uma comparação com os resultados obtidos via experimental. Esta comparação teve como objetivo a calibração dos modelos numéricos, por forma a tornar fiáveis os resultados e conclusões obtidos no estudo numérico. Pretendeu-se assim, uma avaliação da evolução de temperaturas, deslocamentos laterais e verticais, esforços axiais e estados de tensão ao longo do tempo.

4.4.1. Comparação Ensaios Numéricos vs Ensaios Experimentais

Os resultados obtidos experimentalmente serviram como ponto de partida para a calibração dos modelos numéricos, para produzir resultados via numérica o mais próximo possível da realidade. Deste modo, após a conclusão do trabalho experimental e conclusão dos modelos

numéricos e sua calibração, são apresentados e analisados neste subcapítulo os resultados obtidos em ambos os métodos.

É de referir que nas figuras apresentadas seguidamente, os resultados obtidos pela via experimental estão representados sempre a traço contínuo, enquanto os resultados obtidos via numérica são representados a traço-ponto.

4.4.1.1 Análise das forças de restrição

Através da análise dos gráficos 4.1, 4.2 e 4.3, pode ser observada a evolução das forças de restrição calculadas no topo do pilar, para ambas as vias experimental e numérica, e para os três casos objeto de estudo neste trabalho.

Através do gráfico 4.1, observa-se uma correlação aceitável entre as forças axiais de origem térmica nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas em termos de tendência de crescimento, valor de pico e tendência de decréscimo. Existe um ligeiro adiantamento no aumento das forças nas simulações, em relação ao correspondente valor experimental, que poderá ser explicado por uma rigidez das vigas do pórtico de restrição, diferente nos ensaios experimental e numérico. Esse facto pode ainda ser devido ao módulo de elasticidade do aço considerado no modelo ser ligeiramente diferente do real, dado que não foram feitos ensaios para medição das propriedades do aço dos pórticos.

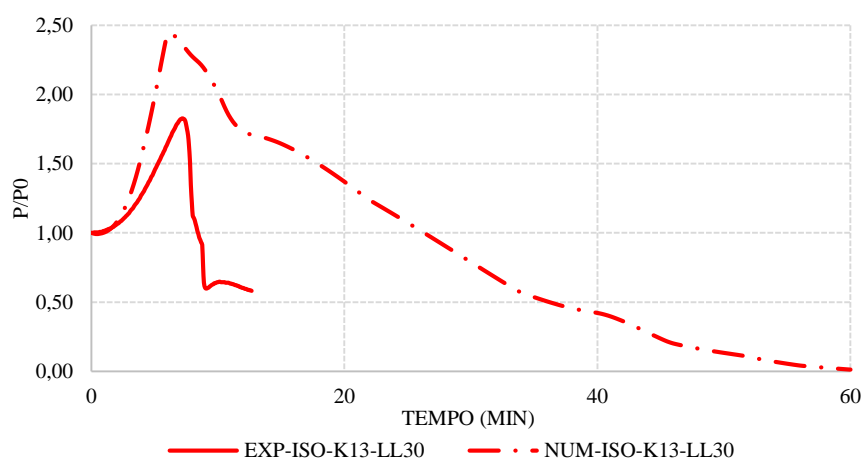


Gráfico 4.1 - Evolução das forças de restrição no pilar isolado, obtidas por via numérica e experimental

Os gráficos 4.2 e 4.3 demonstram uma correlação pouco aceitável entre as forças axiais de origem térmica nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas para as duas orientações do pilar em relação à parede de alvenaria. Embora se possa visualizar um andamento idêntico das curvas, ou seja, primeiro uma tendência de subida e em seguida de descida, os valores de pico são díspares, sendo mais notada essa diferença no caso do pilar com a alma paralela à parede. Existe um considerável adiantamento no aumento das forças nas simulações em relação ao correspondente valor experimental, explicado por possíveis deslocamentos nos apoios, rigidez das vigas do pórtico de restrição, diferente no experimental e no numérico. Assim como,

para o caso do pilar isolado, esse facto pode ser igualmente explicado, devido ao módulo de elasticidade do aço considerado no modelo ser ligeiramente diferente do real, dado que não foram feitos ensaios para medição desta propriedade do aço dos pórticos.

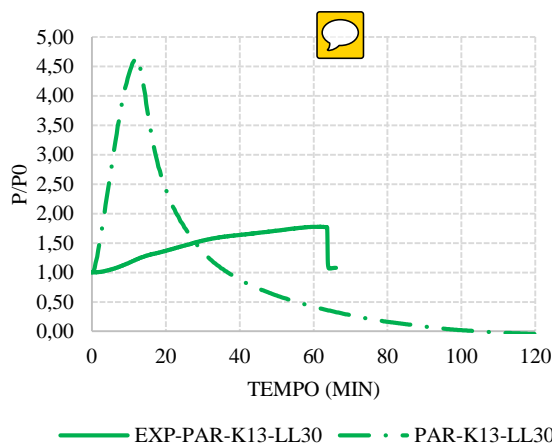


Gráfico 4.2 - Evolução das forças de restrição no pilar com a alma paralela à parede, obtidas por via numérica e experimental

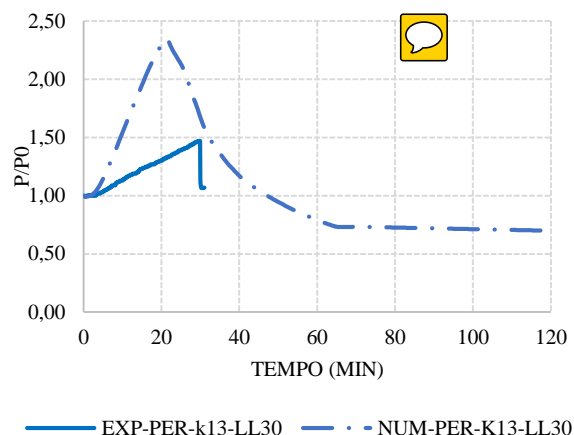


Gráfico 4.3 - Evolução das forças de restrição no pilar com a alma perpendicular, obtidas por via numérica e experimental

4.4.1.2 Análise de temperaturas

Observando o gráfico 4.4, visualiza-se uma aceitável concordância entre as curvas respetivas dos dois métodos de ensaio, numérico e experimental. As diferenças observadas entre curvas prendem-se com fatores incontrolláveis dos ensaios experimentais, tais como, incorreto isolamento, permitindo saídas de calor para o exterior e eventuais avarias no forno de ensaio.

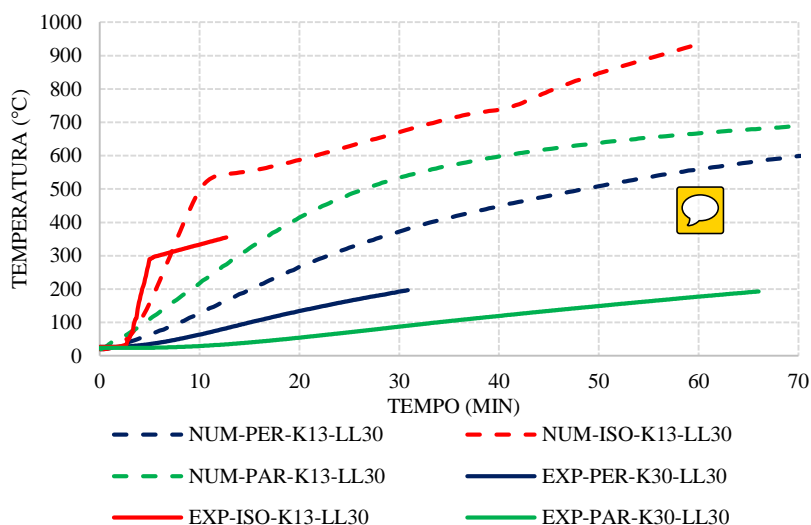


Gráfico 4.4 - Evolução das temperaturas nos pilares, obtidas por via numérica e experimental

No anexo VI, estão patentes imagens da forma como foi aplicado o aquecimento nas simulações numéricas, aplicação de convecção e radiação no pilar e na parede. Podem ainda visualizar-se as temperaturas observadas no programa ABAQUS para os dois casos de estudo, do pilar inserido em paredes.

4.4.1.3 Deslocamentos verticais

A comparação entre os deslocamentos verticais no topo dos pilares obtida via experimental e numérica, realiza-se no gráfico 4.5. A fase inicial do ensaio mostra uma boa concordância, em termos de tendência de crescimento, embora a mesma se altere logo para os valores de pico e de final dos ensaios, existindo discrepância entre os dois métodos. A inversão do sentido de crescimento das curvas ocorre aquando do alcançar dos valores de pico. A diferença observada entre os métodos deve-se à incorreta utilização do valor de rigidez do pórtico no modelo numérico, ou por erros ocorridos na medição dos deslocamentos verticais nos ensaios laboratoriais.

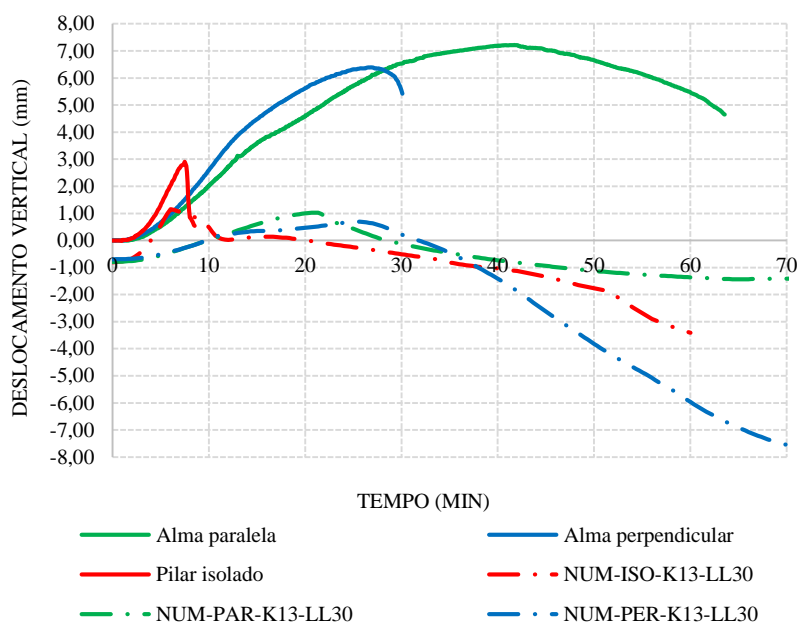


Gráfico 4.5 - Evolução dos deslocamentos verticais no centro do pórtico, obtidos por via numérica e experimental

Os deslocamentos verticais observados no programa ABAQUS, para os dois casos de estudo do pilar inserido em paredes, estão presentes no anexo VI.

4.4.1.4 Análise das temperaturas

Conforme referido anteriormente, a evolução de temperaturas nos pilares de aço tem grande influência no tempo de resistência e comportamento ao fogo dos mesmos. Deste modo, a

disposição das paredes de alvenaria tem uma forte influência na evolução de temperaturas ao longo do pilar. No gráfico 4.6 observa-se a evolução de temperaturas na alma do perfil de aço, para as duas orientações da alma dos pilares em relação à parede de alvenaria, para o pilar isolado e suas comparações com a curva de incêndio padrão ISO 834.

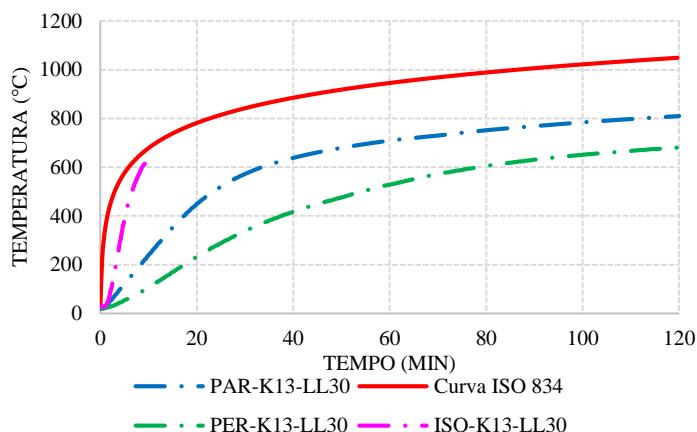


Gráfico 4.6 - Temperaturas na alma dos pilares para as simulações numéricas PAR-K13-LL30, PER-K13-LL30, ISOLADO-K13-LL30 e comparação com a curva, ISO 834

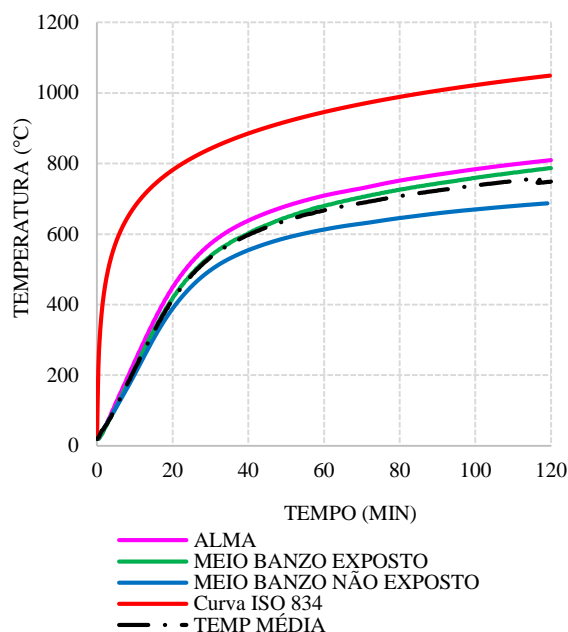
No caso do pilar isolado, em que o tempo de ensaio é bastante reduzido, verifica-se uma proximidade da curva de evolução de temperatura com a curva ISO 834.

Face à maior área exposta do pilar de aço com a alma paralela à parede, de forma idêntica ao pilar isolado, verifica-se um acompanhamento da evolução de temperatura mais próximo da curva ISO 834, comparativamente o caso da alma perpendicular, reflete um maior afastamento, devido ao maior isolamento proporcionado pela existência das paredes.

Da análise dos gráficos 4.7 e 4.8, verificam-se diferenças nas temperaturas atingidas nas partes expostas e não expostas do perfil. Pode observar-se que com a alma paralela à parede, o aumento de temperaturas nas várias partes da secção é bastante mais próximo que no caso da outra orientação do perfil. Além disso, verifica-se que no caso da alma paralela, o gradiente térmico entre a parte exposta e não exposta ao fogo é menor (cerca de 150°C), que o obtido no caso da alma perpendicular (aproximadamente 600°C). Estas conclusões eram espectáveis, e justificadas pela maior proteção do pilar conferida pelas paredes, no caso da orientação perpendicular.

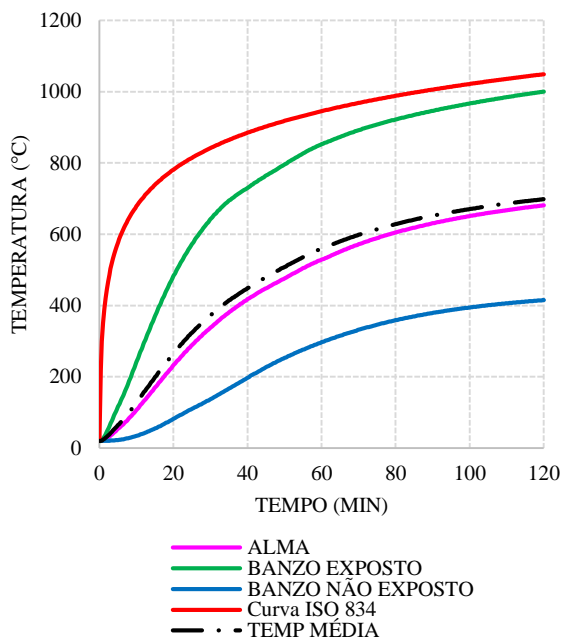
Os gráficos seguintes (4.7 e 4.8), reproduzem a simulação numérica referente aos ensaios experimentais.

Em ambas as disposições do pilar relativamente às paredes de alvenaria, verifica-se que a temperatura da alma do pilar se aproxima bastante da temperatura média do perfil. Esta conclusão é relevante, e poderá ser útil em trabalhos futuros, no desenvolvimento de métodos simplificados de análise do comportamento estrutural destes pilares.



a)

Gráfico 4.7 - Temperatura nas várias partes da secção transversal do pilar – caso NUM-PAR-K13-LL30



b)

Gráfico 4.8 - Temperatura nas várias partes da secção transversal do pilar - caso NUM-PER-K13-LL30

4.4.2. Análise das forças de restrição



As forças de restrição geradas no pilar, provocadas pela dilatação térmica, são motivo de análise em seguida. A orientação da seção transversal e o nível de carregamento aplicados, são fatores que serão apresentados e analisados nos gráficos seguintes.

Importa referir que a rigidez com que se efetuaram os estudos experimentais e numéricos foi sempre a mesma, 13 kN/mm, como já mencionado, e atendendo a que recentes trabalhos de investigação sobre este assunto (Correia, 2011) mostraram que a resistência ao fogo de pilares em estruturas, independe da rigidez da estrutura circundante.

Essa rigidez foi garantida, colocando os pilares periféricos na posição mais afastada do centro. Os gráficos seguintes (4.9 a 4.18) representam a evolução das forças de restrição de origem térmica, relativamente ao valor inicial em função do tempo, para os diferentes níveis de carregamento e orientação da alma paralela e perpendicular em relação à parede.

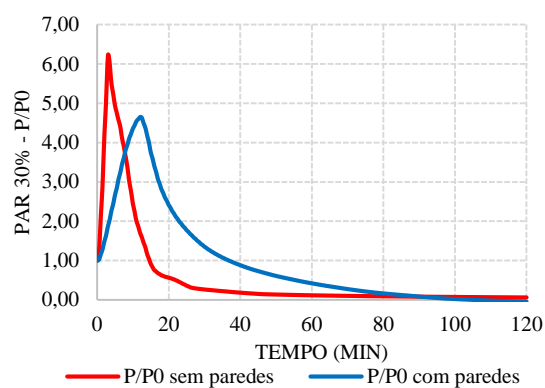


Gráfico 4.9 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL30

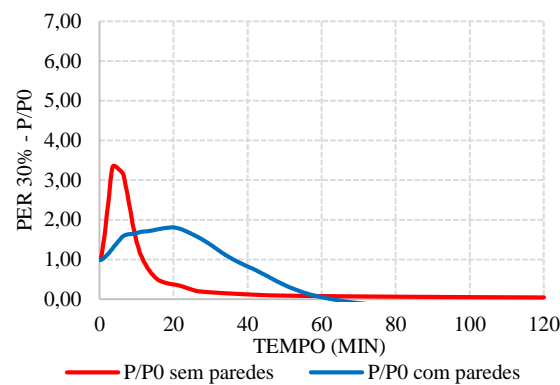


Gráfico 4.10 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL30

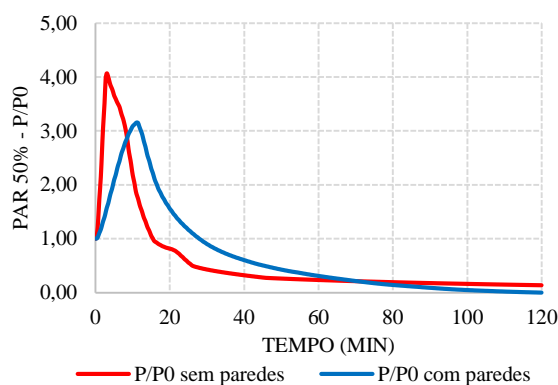


Gráfico 4.11 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL50

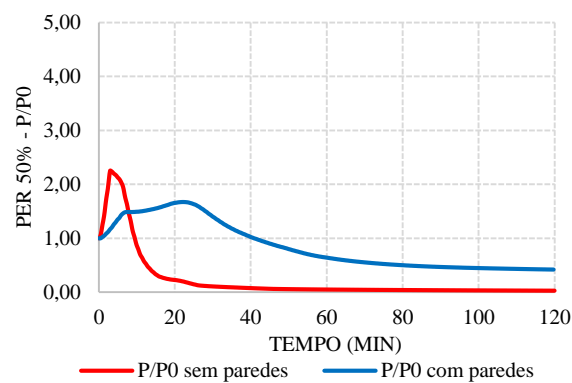


Gráfico 4.12 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL50

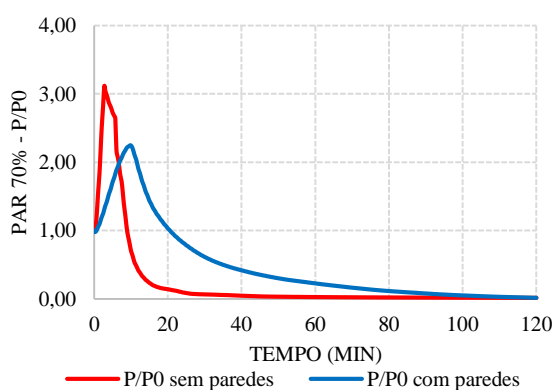


Gráfico 4.13 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL70

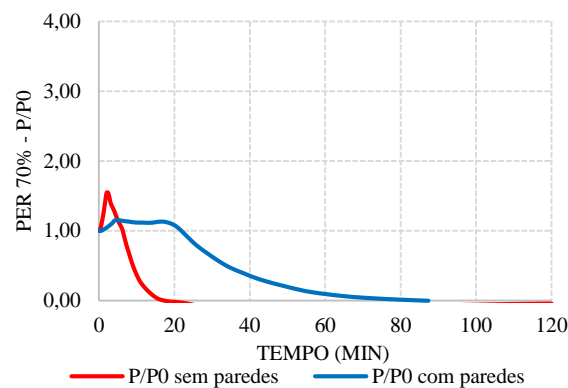


Gráfico 4.14 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL70

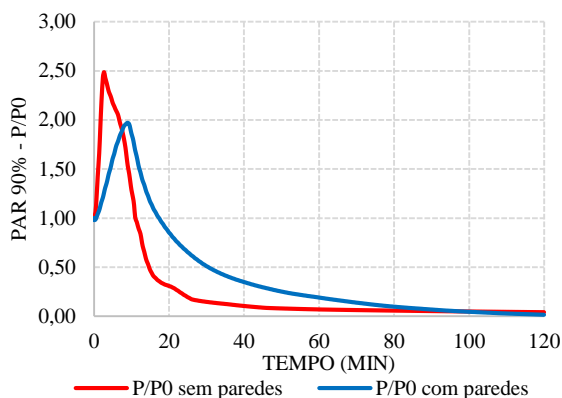


Gráfico 4.15 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL90

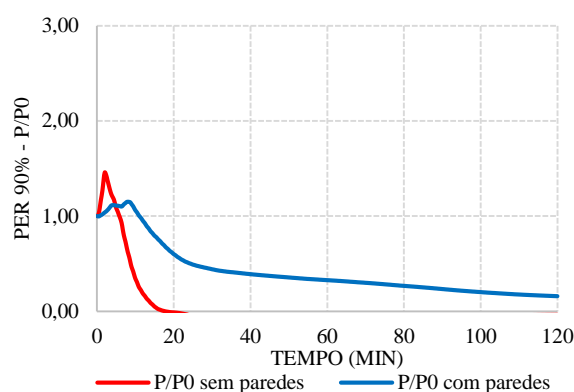


Gráfico 4.16 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL90

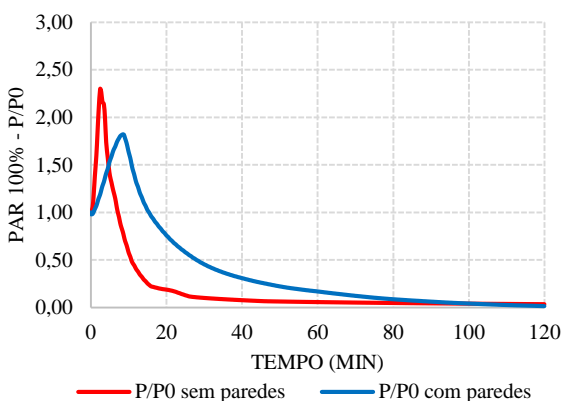


Gráfico 4.17 - Curvas P/P0 para o estudo sem paredes ao longo do tempo PAR-K13-LL100

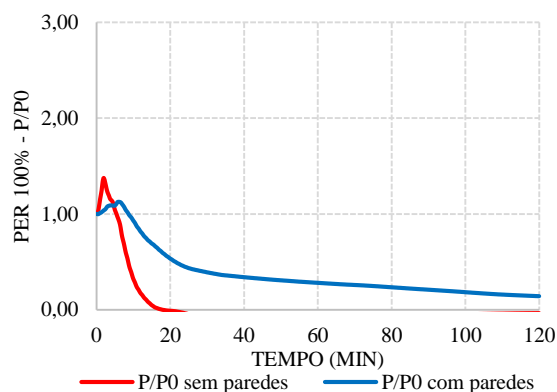


Gráfico 4.18 - Curvas P/P0 para o estudo com paredes ao longo do tempo PER-K13-LL100

No quadro 4.2 apresenta-se o resumo dos valores de P/P0 máximos observados para os casos de estudo do pilar inserido em paredes de alvenaria, com a alma paralela e perpendicular à mesma, sem e com paredes. O quadro permite a visualização da evolução das forças de restrição de origem térmica, refletida nos gráficos anteriores, relativamente ao valor inicial em função do tempo, para os diferentes níveis de carregamento e orientação da secção do perfil em relação à parede de alvenaria.

Quadro 4.2 - Resumo dos valores de P/P0 retirados dos gráficos anteriores

Nível de carregamento	P/P0 – Pilar com a alma paralela à parede de alvenaria		Nível de carregamento	P/P0 – Pilar com a alma perpendicular à parede de alvenaria	
	Sem paredes	Com paredes		Sem paredes	Com paredes
30%	6,2	4,5	30%	3,4	1,80
50%	4,1	3,1	50%	2,3	1,70
70%	3,1	2,3	70%	1,6	1,20
90%	2,5	2,0	90%	1,45	1,20
100%	2,3	1,7	100%	1,40	1,20

Pela análise dos gráficos 4.9, 4.11, 4.13, 4.15 e 4.17, alma do perfil paralela à parede de alvenaria, verifica-se que nos instantes iniciais existe uma tendência de crescimento das curvas que para os casos do perfil isolado se inverte aproximadamente aos 5 minutos, tendo a partir desse momento uma tendência de decréscimo até aos 80 minutos, mantendo-se posteriormente constante até ao final dos ensaios (120 minutos).

Nos casos do pilar com a alma perpendicular à parede de alvenaria, a tendência de crescimento já varia um pouco para os diferentes níveis de carregamento, sendo que para os 30%, 50% e 70% de carregamento aplicado existe uma tendência de crescimento das curvas, invertendo-se a mesma aproximadamente aos 20 minutos, enquanto que para os níveis de carga 90% e 100% a tendência de crescimento das curvas é muito menos acentuada.

Para o nível de carregamento de 30% dá-se o decréscimo abrupto da curva a partir dos 20 minutos, sendo que aos 60 minutos atinge o valor zero, de forma idêntica para os 70% de carregamento existe um decréscimo abrupto a partir dos 20 minutos.

Para o nível de 50% de carregamento, até aproximadamente aos 22 minutos a curva tem tendência de decréscimo, e a partir daí inverte o sentido até aos 80 minutos, mantendo-se depois num valor constante até ao final do ensaio (120 minutos).

O perfil isolado tem andamento muito idêntico ao do caso do perfil isolado paralelo, apenas se verificando uma diferença a partir dos 90% de carregamento, onde aos 20 minutos os valores das forças de restrição se anulam.

O caso do pilar com a alma paralela à parede de alvenaria é bastante semelhante para os diferentes níveis de carregamento, tendo uma tendência de crescimento até aos 10 minutos, invertendo depois esse sentido, quando atinge o valor máximo da força de restrição, apresentando depois a tendência de decréscimo contínuo até ao final dos ensaios (120 minutos).

Os gráficos 4.19 e 4.21 demonstram a comparação da evolução das forças de restrição para todos os níveis de carregamento, sem paredes, para os dois casos de estudo. Os gráficos 4.20 e 4.22 representam a evolução das forças de restrição, igualmente para todos os níveis de carregamento, com paredes, para o perfil com a alma paralela e perpendicular à parede de alvenaria respetivamente.

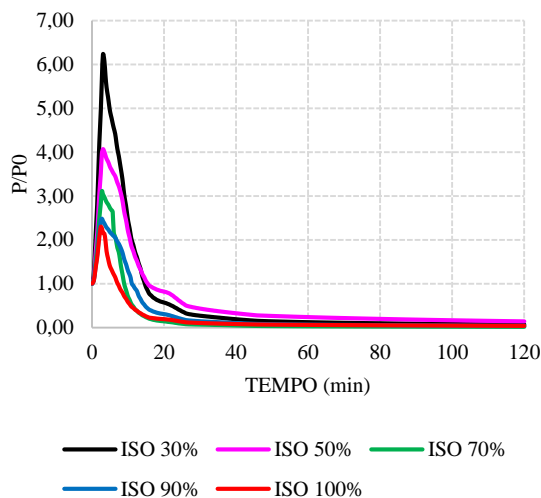


Gráfico 4.19 - Curva P/P0 ao longo do tempo sem paredes – Deformação sobre o eixo fraco

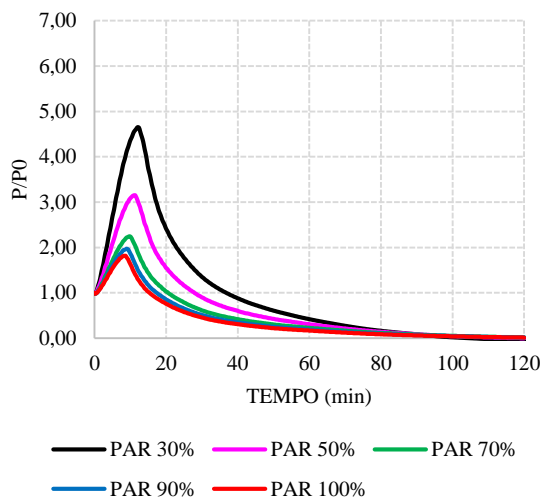


Gráfico 4.20 - Curva P/P0 ao longo do tempo com paredes - Casos com alma paralela à parede

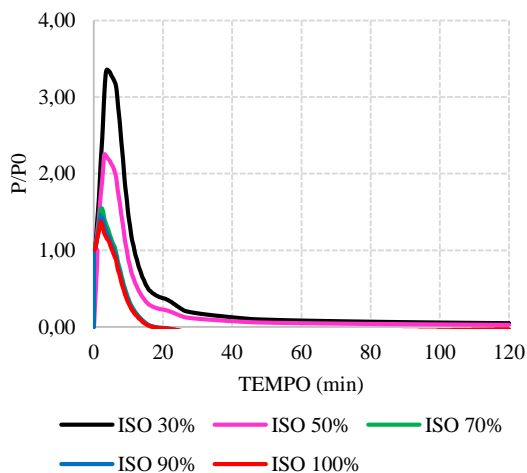


Gráfico 4.21 - Curva P/P0 ao longo do tempo sem paredes – Deformação sobre o eixo forte

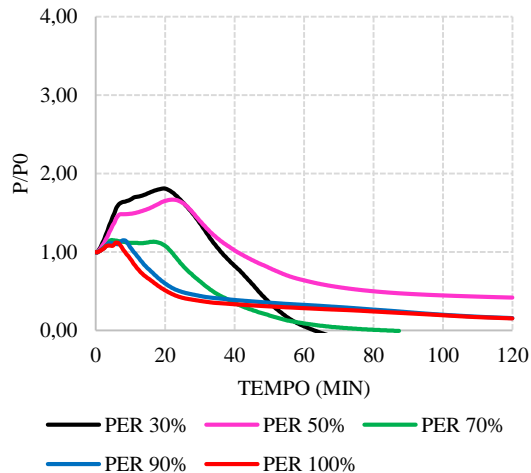


Gráfico 4.22 - Curva P/P0 ao longo do tempo com paredes - Casos com alma perpendicular à parede

Importa referir neste ponto que as curvas do gráfico 4.19 foram obtidas para a flexão em torno do eixo fraco do pilar em secção H, obtendo-se a deformada do pilar no plano paralelo aos

banzos. No caso do gráfico 4.21 as curvas foram obtidas para a flexão em torno do eixo forte do pilar em secção H, estabelecendo restrições para a deformada se dar no plano perpendicular aos banzos.

A principal conclusão deste estudo paramétrico foi que a resistência ao fogo dos pilares inseridos em paredes foi sempre maior do que a resistência ao fogo dos pilares totalmente envolvidos pelas chamas. Também foi possível observar o diferente andamento das curvas de P/P_0 , principalmente as suas fases de decaimento que são bastante diferentes no caso da orientação do perfil com alma perpendicular à parede.

Os gráficos seguintes (4.23 a 4.32) representam a evolução das tensões verticais dos elementos finitos no topo do pilar para os modelos com paredes. Após integração e multiplicação pela área referente ao elemento respetivo (banzos e alma, ou meios-banzos e alma), permitem a obtenção do esforço axial no topo do pilar para os dois casos de estudo em cada um dos elementos da secção. Considerou-se igualmente para a estrutura circundante uma rigidez de 13 kN/mm, para os diferentes níveis de carregamento. Este valor foi obtido pelo posicionamento dos pilares periféricos no pórtico de restrição.

Nos gráficos seguintes pode analisar-se o esforço axial positivo como um esforço de compressão e o esforço axial negativo como de tração, de forma a tornar a análise gráfica mais agradável.

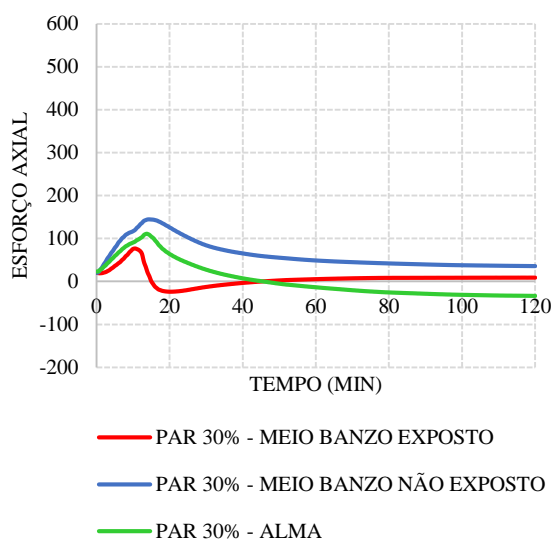


Gráfico 4.23 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL30

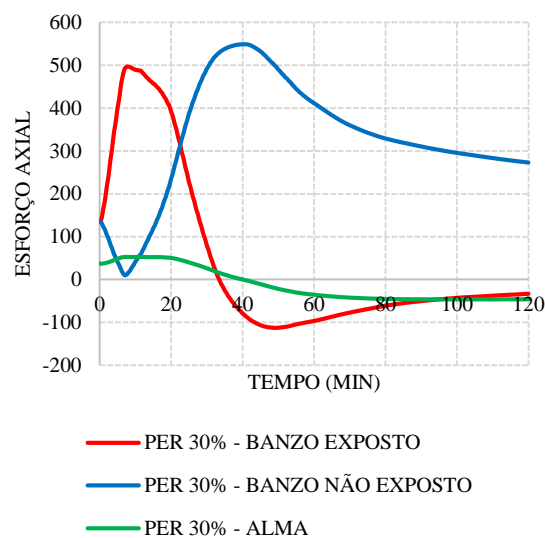


Gráfico 4.24 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL30

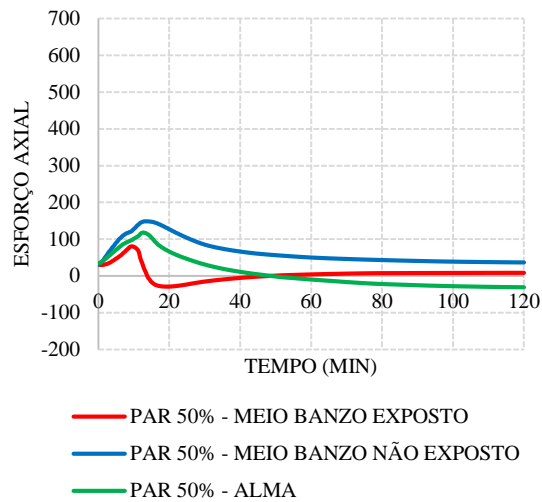


Gráfico 4.25 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL50

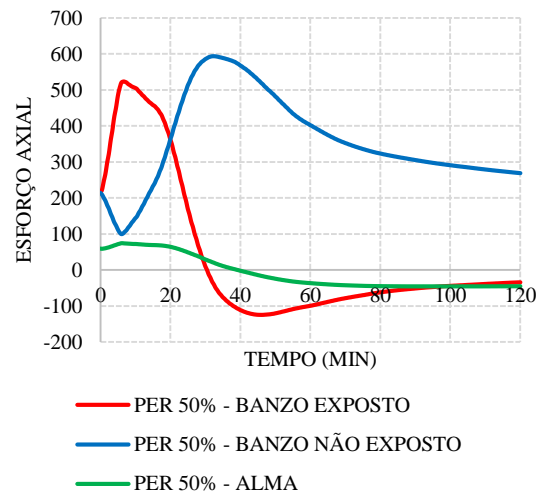


Gráfico 4.26 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL50

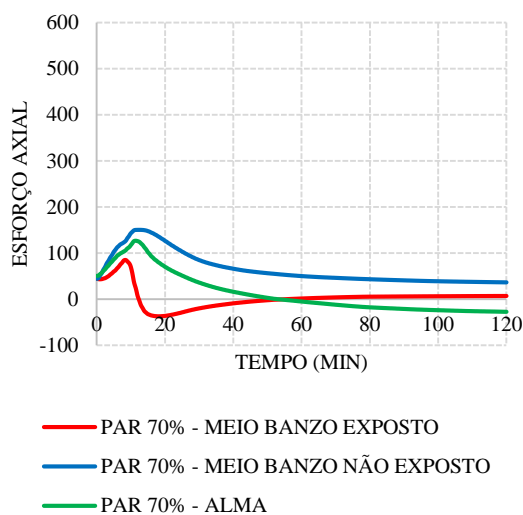


Gráfico 4.27 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL70

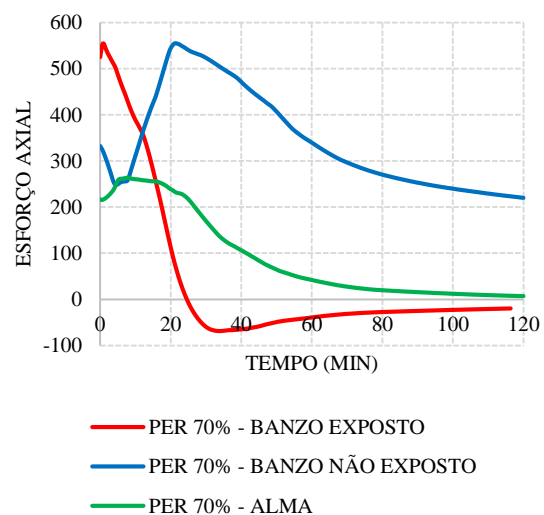


Gráfico 4.28 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL70

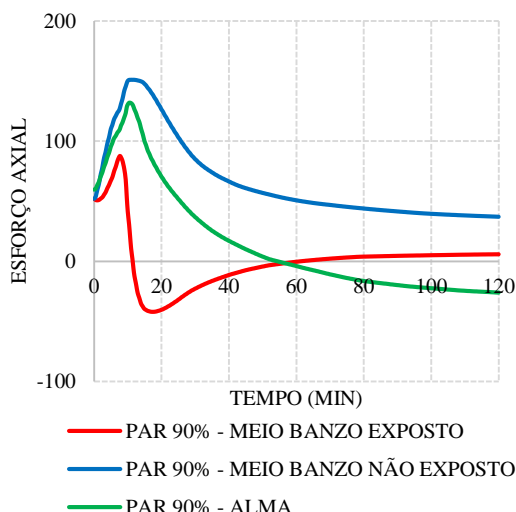


Gráfico 4.29 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL90

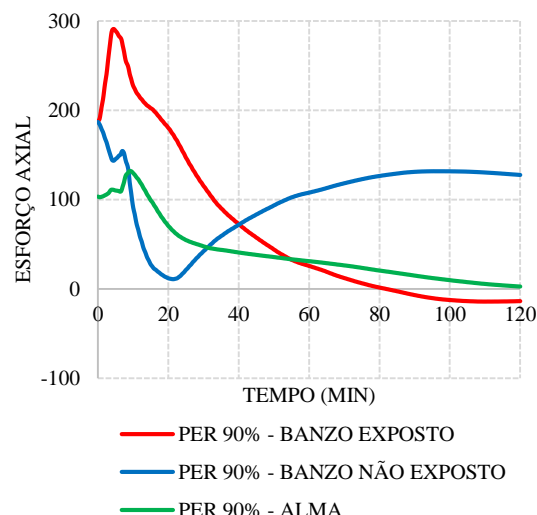


Gráfico 4.30 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL90

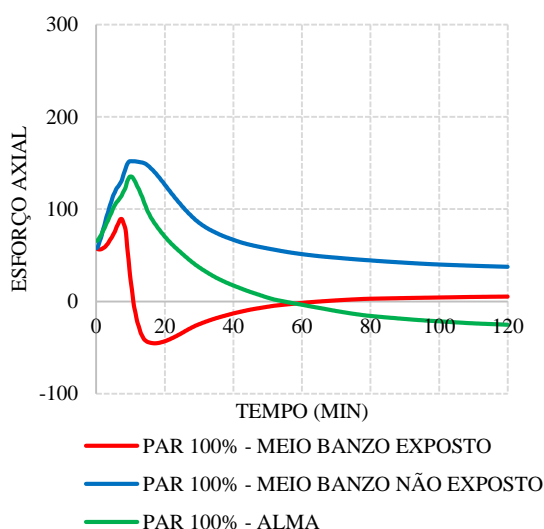


Gráfico 4.31 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PAR-K13-LL100

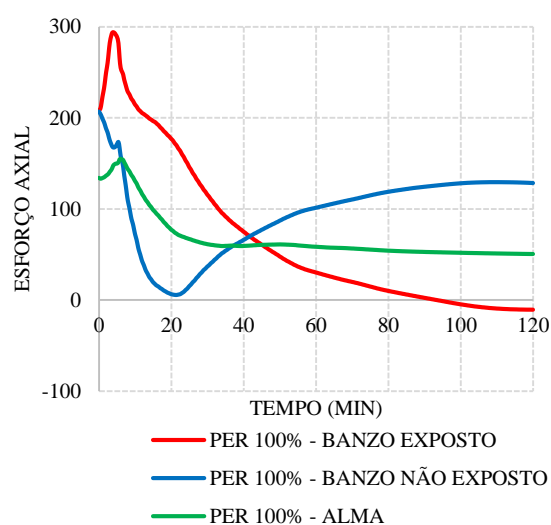


Gráfico 4.32 - Curvas do esforço axial para as diferentes secções PER-K13-LL100

Da análise dos gráficos anteriores para o pilar com a alma paralela relativamente à parede de alvenaria, verificou-se um esforço axial superior na zona dos meios banzos não expostos ao fogo. No caso do pilar com a alma perpendicular, não se verifica essa situação, pois existe uma inversão entre o esforço axial resistido pelo banzo exposto e pelo banzo não exposto. Comparativamente ao esforço axial entre a alma e os banzos, no pilar com a alma paralela à parede, a alma tem um peso significativo na solicitação de esforço axial. Para o caso do pilar

com a alma perpendicular à parede verifica-se uma maior influência de esforço axial na zona dos banzos, tendo a alma uma contribuição muito menor.

Pode ainda observar-se, relativamente aos gráficos anteriores, que o andamento das curvas de esforço axial, para o caso do pilar com a alma paralela à parede, é idêntico para o meio banzo não exposto e alma, existindo inicialmente uma tendência de subida que se inverte, sensivelmente aos 10 minutos. Para o meio banzo exposto as curvas são igualmente idênticas, para os distintos níveis de carregamento, visualizando-se, no entanto, uma tendência de subida e depois descida abrupta por volta dos 10 minutos. Em seguida, nova subida que estabiliza após o encontro com a curva de esforço axial da alma e se mantém até ao final da simulação num valor praticamente constante de esforço axial.

No caso do pilar com a alma perpendicular à parede, o banzo exposto tem para os diferentes níveis de carregamento, a mesma evolução de curva. Situação não verificada para o banzo não exposto que para o carregamento de 30%, 50% e 70% inicia com uma tendência de decréscimo que se inverte por volta dos 5 minutos, aumentando a partir desse instante o esforço axial, até um valor aproximado, para as três condições de carregamento. Após esse valor de pico a curva volta a ter uma tendência de decréscimo até sensivelmente aos 40 minutos, voltando posteriormente à tendência de crescimento até ao final do ensaio.

Para os restantes níveis de carregamento o andamento das curvas do banzo não exposto e da alma, decorrem abaixo da curva de esforço axial do banzo exposto. Quanto ao andamento das mesmas, iniciam igualmente com uma tendência de decréscimo, apenas se invertendo aproximadamente aos 20 minutos, onde começa o crescimento tomando valores de esforço axial iguais para com o banzo exposto aos cerca de 40 minutos, voltando a ter uma tendência de decréscimo a partir dos 100 minutos até ao final do ensaio.

Para o banzo exposto e alma, as curvas seguem um andamento semelhante para os cinco níveis de carregamento, embora o banzo exposto tenha tendências de descida e subida mais abruptas.

No anexo VI, podem observar-se imagens retiradas do programa ABAQUS, onde se visualizam as tensões verticais dos elementos finitos no topo do pilar que, posteriormente após se efetuar a integração e multiplicação pela área do respetivo elemento (banzos e alma), se obtém o esforço axial no topo do pilar.

4.4.3 - Análise do deslocamento lateral

Nos gráficos seguintes apresentam-se os resultados dos deslocamentos laterais verificados no ponto a meia altura dos pilares de aço, para as diferentes orientações em relação à parede de alvenaria e carregamento aplicado.

Os gráficos 4.33, 4.34 e 4.35 contemplam as curvas de deslocamento lateral para o pilar isolado e para as duas orientações da alma do pilar em relação à parede de alvenaria, 13 kN/mm de rigidez da estrutura circundante, os 30% de carregamento aplicado e a comparação entre ensaio experimental e numérico.

Conclui-se que as curvas de deslocamentos laterais, comparativamente, em ensaio experimental e numérico têm andamentos aceitáveis para o caso do pilar isolado. Situação que no caso das duas orientações distintas do pilar em relação à parede de alvenaria apenas se confirma nos instantes iniciais, verificando um afastamento brusco das curvas a partir sensivelmente do instante 20 minutos, justificado eventualmente por imperfeições geométricas difíceis de contabilizar no ensaio experimental para posteriormente reprodução no modelo numérico.

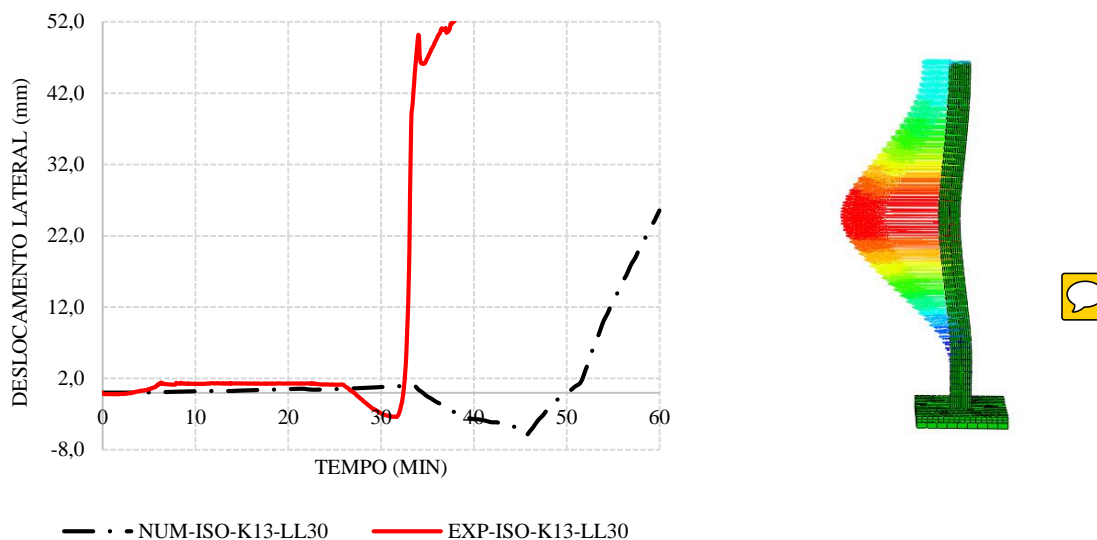


Gráfico 4.33 - Deslocamentos laterais a meia altura – pilar isolado

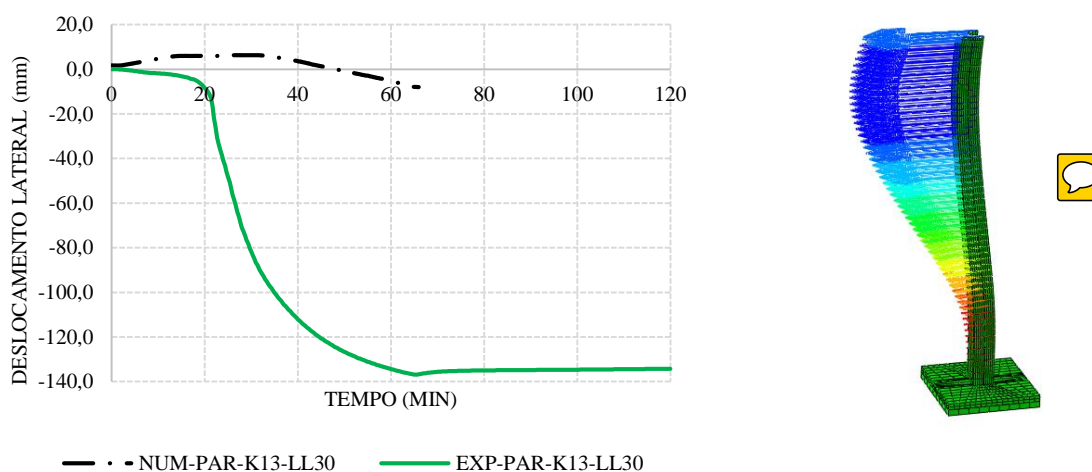


Gráfico 4.34 - Deslocamentos laterais a meia altura - caso com a alma paralela à parede

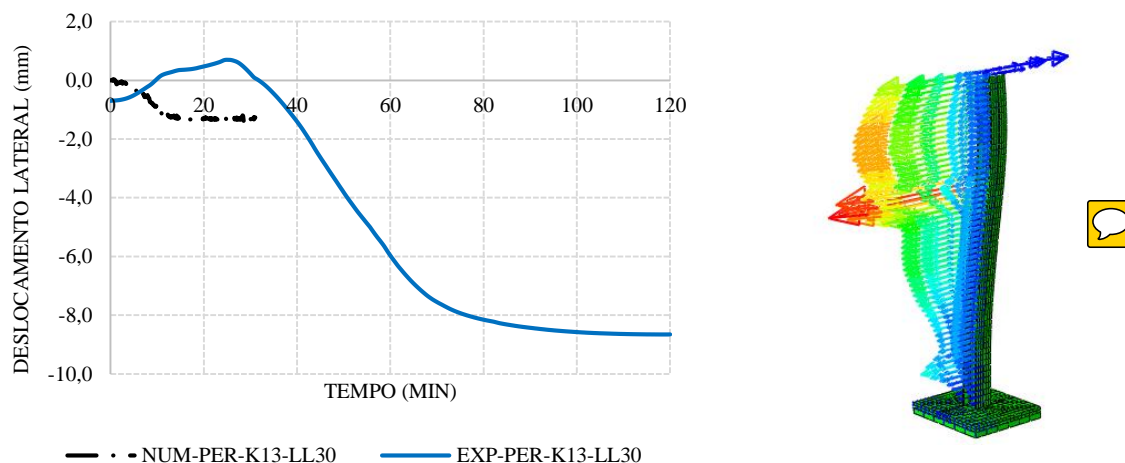


Gráfico 4.35 - Deslocamentos laterais a meia altura - caso com a alma perpendicular à parede

No gráfico 4.36 apresentam-se os deslocamentos laterais a meia altura, comparando as duas orientações do perfil em relação à parede de alvenaria e o pilar isolado, considerando igualmente a rigidez circundante da estrutura 13 kN/mm.

Observa-se que nos instantes do início do ensaio, as várias curvas se encontram bastante próximas. Apenas no caso do ensaio com nível de carregamento 30, e o perfil colocado com a alma paralela às paredes, se verifica maiores diferenças a partir dos 20 minutos.

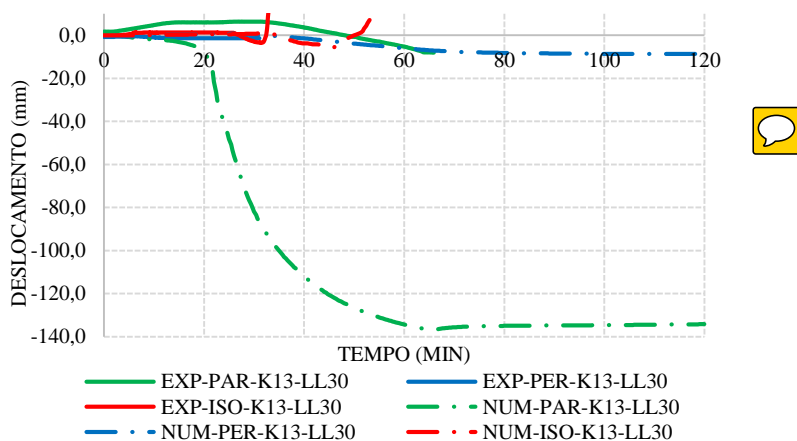


Gráfico 4.36 - Comparação dos deslocamentos laterais a meia altura para as duas orientações do pilar em relação à parede de alvenaria e pilar isolado, simulação numérica e experimental

Com a análise do gráfico 4.37 reforça-se a ideia de que, nos momentos iniciais, os deslocamentos laterais são aceitavelmente próximos na comparação entre modelos numéricos e resultados dos ensaios experimentais em laboratório.

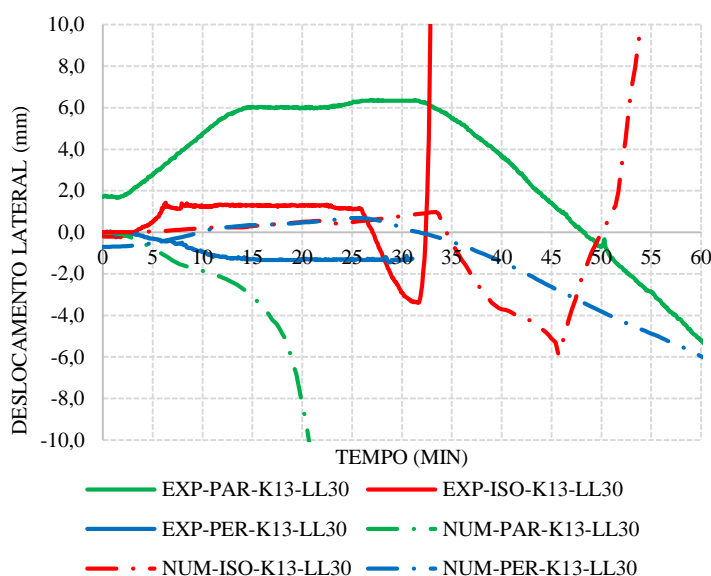


Gráfico 4.37 - Pormenor do gráfico anterior da comparação dos deslocamentos laterais a meia altura para as duas orientações do pilar e pilar isolado, simulação numérica e experimental

Tal situação não se verifica para restante período de ensaio, onde para o caso do perfil com a alma paralela à parede de alvenaria o andamento das curvas de ensaio numérico e experimental é completamente distinto.

No caso do pilar com a alma perpendicular, embora as curvas se aproximem em alguns instantes, o andamento das mesmas é distinto.

O caso do pilar isolado é aquele onde se visualiza a maior proximidade das curvas, inicialmente tendência de subida, posteriormente de descida e seguidamente subida abrupta, sendo que os instantes dessas movimentações, são diferentes para os dois ensaios, numérico e experimental.

Deve ainda mencionar-se que os tempos de duração dos ensaios experimentais foi sempre diferente dos tempos dos ensaios numéricos.

As diferenças aqui observadas terão certamente a ver com as imperfeições geométricas que são impossíveis de quantificar nos ensaios experimentais, para posterior consideração nos modelos numéricos.

Os deslocamentos laterais observados no programa ABAQUS, para os dois casos de estudo do pilar inserido em paredes, estão patentes no anexo VI.

5. ESTUDO ANALÍTICO DO FENÓMENO DE “THERMAL BOWING”

No presente capítulo efetua-se uma análise das propriedades dos materiais que foram utilizados nos modelos numéricos. Estas propriedades têm uma grande importância no fenómeno de “*Thermal Bowing*”, cujo o estudo se pretende abordar na presente dissertação.

O “*Thermal Bowing*” é um fenómeno de inversão de momentos fletores que ocorre em elementos estruturais com aquecimento diferencial e dilatação térmica restringida. Quando se dá o aquecimento de um elemento estrutural apenas de um lado, devido à restrição à dilatação proporcionada pela estrutura circundante, o elemento tem tendência a dilatar mais do lado aquecido. Como se encontra restringido nas extremidades, essa dilatação vai manifestar-se sob a forma de curvatura para o lado aquecido, com consequentes flechas laterais. Por outro lado, a partir dos 400°C os elementos de aço começam a sofrer uma redução considerável da sua tensão de cedência. Por este facto, a partir do momento em que parte da secção atinge esse valor de temperatura, a secção transversal do elemento em estudo deixa de ser uma secção simétrica em virtude de o seu centro de gravidade se deslocar para o lado não aquecido. Uma vez que a força axial resultante das tensões normais nessa secção tem como ponto de aplicação o centro de gravidade, esse deslocamento vai provocar o aparecimento de momentos fletores que se vão opor aos momentos fletores iniciais proporcionados pela restrição à rotação nas extremidades do elemento.

Pelo exposto torna-se de extrema importância a consideração correta das propriedades dos materiais, nomeadamente do aço, e a sua variação com o aumento da temperatura.

5.1 Propriedades do aço

5.1.1 Propriedades térmicas

Seguidamente serão apresentadas as propriedades térmicas do aço:

- O alongamento térmico $\frac{\Delta L}{L}$, e o calor específico do aço c_a , são definidos na norma, Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), de acordo com os gráficos 5.1 e 5.2.

No gráfico 5.1 pode observar-se a extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura.

No gráfico 5.2 visualiza-se o calor específico do aço carbono em função da temperatura.

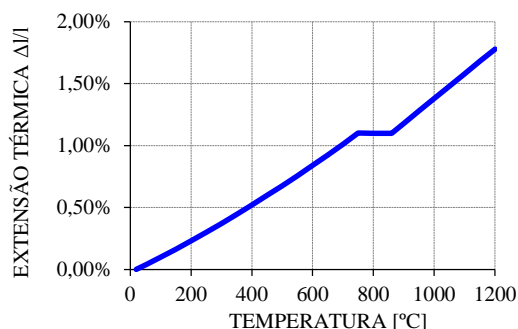


Gráfico 5.1 – Alongamento relativo do aço carbono em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2010)

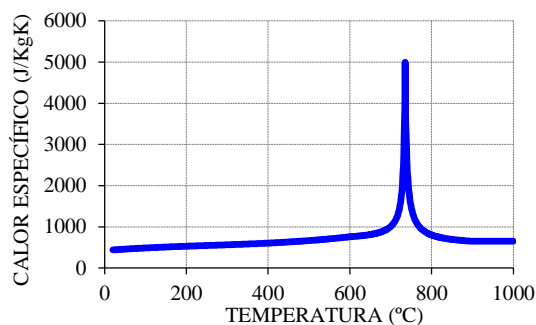


Gráfico 5.2 - Calor específico do aço de carbono em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2010)

A condutividade térmica do aço de carbono λ_a , em função da temperatura está ilustrada no gráfico 5.3:

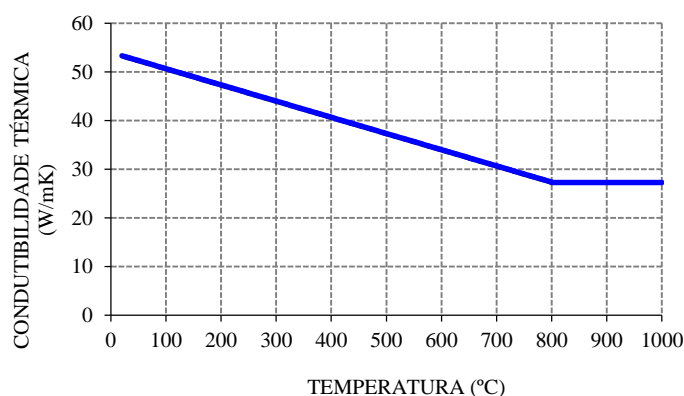


Gráfico 5.3 - Condutividade térmica do aço carbono em função da temperatura, EN 1993-1-2 (2010)

5.1.2 Propriedades mecânicas

A relação tensão-deformação dada no gráfico 5.4 deve ser usada para determinar a resistência de elementos estruturais do aço. No gráfico mencionado, podem observar-se quatro zonas. Na primeira visualiza-se claramente a lei de Hook com a zona elástica. A segunda zona define-se por uma curva elíptica, limitada pelo limite de elasticidade, que corresponde ao início da flexão. Na terceira zona, a tensão é constante e igual ao limite de elasticidade, o que corresponde à zona plástica. A última zona caracteriza-se por uma diminuição linear da tensão de cedência.

Fatores de redução da relação tensão-deformação são ilustrados no gráfico 5.5. Para valores intermédios de temperatura, pode ser usada uma interpolação linear.

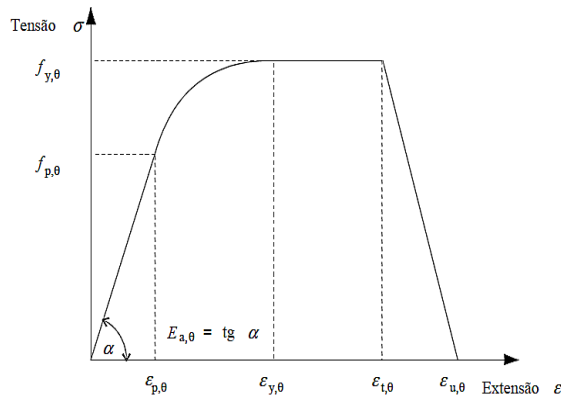


Gráfico 5.4 - Relação de tensão-deformação para o aço de carbono, a temperaturas elevadas, EN 1993-1-2 (2010)

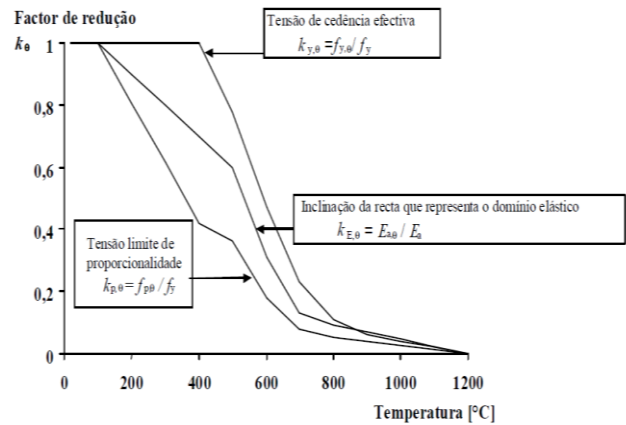


Gráfico 5.5 - Os fatores de redução para a relação de tensão-deformação do aço carbono a temperaturas elevadas, EN 1993-1-2 (2010)

- Tensão de cedência em relação à tensão de cedência a 20 $^{\circ}\text{C}$ $k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$
- Limite de proporcionalidade em relação à tensão de cedência a 20 $^{\circ}\text{C}$ $k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y}$
- Módulo de elasticidade linear em relação ao módulo de elasticidade a 20 $^{\circ}\text{C}$ $k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$

No gráfico 5.5, pode observar-se que, o fator de redução $k_{y,\theta}$, sofre uma queda abrupta quando a temperatura atinge os 400 $^{\circ}\text{C}$. O limite de proporcionalidade, em relação à resistência à deformação é reduzido pelo fator $k_{p,\theta}$. O módulo de Young é reduzido pelo fator de redução $k_{E,\theta}$. Este fator também sofre uma redução, uma vez que está relacionado com a tensão limite de proporcionalidade.

O quadro que se segue determina a forma da relação tensão-deformação para o aço carbono, a temperaturas elevadas, tal como definido no Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010).

Quadro 5.1 - Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas, EN 1993-1-2 (2010)

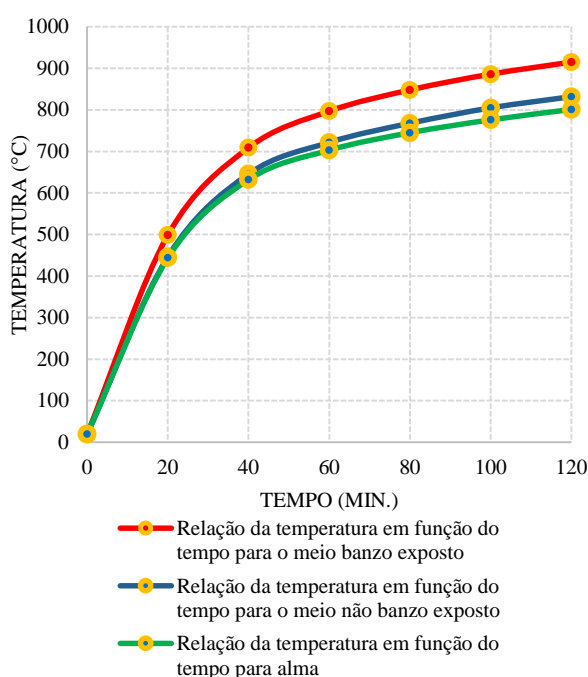
Domínio de extensões	Tensão, $\sigma(\theta)$	Módulo tangente
$\varepsilon \leq \varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon \cdot E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sy,\theta})^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sy,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\varepsilon_{st,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{st,\theta})/(\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0,00	-
Parâmetros	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta} \qquad \varepsilon_{sy,\theta} = 0,02 \qquad \varepsilon_{st,\theta} = 0,15 \qquad \varepsilon_{su,\theta} = 0,20$	
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c / E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	
<p>Legenda:</p> <p>$f_{sy,\theta}$ - Tensão de cedência efetiva</p> <p>$f_{sp,\theta}$ - Tensão limite de proporcionalidade</p> <p>$E_{s,\theta}$ - Inclinação da reta que representa o domínio elástico;</p> <p>$\varepsilon_{sp,\theta}$ - Extensão limite de proporcionalidade;</p> <p>$\varepsilon_{sy,\theta}$ - Extensão de cedência</p> <p>$\varepsilon_{st,\theta}$ - Extensão limite para o patamar de cedência;</p> <p>$\varepsilon_{su,\theta}$ - Extensão última</p>		

5.2 Análises

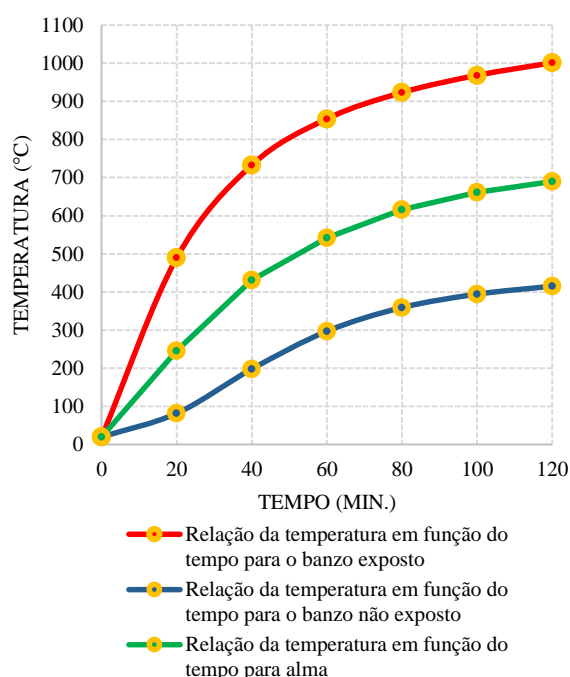
5.2.1.1 Temperaturas

Nos gráficos seguintes é possível visualizar-se o gradiente térmico nos perfis de aço para uma altura de 1,50 m (altura intermédia), no caso do pilar com a alma paralela e perpendicular à parede de alvenaria.

Pode ainda pela observação dos gráficos 5.6 a) e b), mencionar-se que no caso da alma paralela, existe uma maior proximidade entre as temperaturas da zona exposta e não exposta.



a)



b)

Gráfico 5.6 - Representação do gradiente térmico a meia altura do pilar de aço para a simulação numérica a) perfil com a alma paralela à parede b) perfil com a alma perpendicular à parede

Os quadros 5.2 e 5.3 ilustram de uma forma mais pormenorizada as temperaturas atingidas nas diferentes zonas dos perfis de aço. As temperaturas nos banzos ou meios banzos expostos e não expostos, almas e também as temperaturas médias na secção transversal total, para vários instantes de tempo.

Quadro 5.2 - Temperaturas para o perfil com a alma paralela à parede

t (min.)	Meio banzo exposto	Alma	Meio banzo não exposto	Temperatura média
0	20	20	20	20
20	499	444	447	475
40	709	632	646	671
60	797	703	722	750
80	848	745	768	797
100	886	776	805	832
120	915	801	832	925

Quadro 5.3 - Temperaturas para o perfil com a alma perpendicular à parede

t (min.)	Banzo exposto	Alma	Banzo não exposto	Temperatura média
0	20	20	20	20
20	490	246	82	273
40	733	431	198	454
60	854	542	297	564
80	923	616	359	633
100	968	661	394	674
120	1001	690	415	702

5.2.2 Tensões de Von Mises

Nas figuras 5.1 a) e b), apresenta-se o mecanismo de falha do pilar de aço embutido em paredes. Esse comportamento conjugado com o gradiente térmico na direção da alma é conhecido como “*Thermal Bowing*”. Nos momentos iniciais de aquecimento, o perfil segue o sentido do fogo, pelas condições de restrição que estão impostas, a coluna rapidamente inverte o sentido, gerando momentos de flexão. Com o aumento da temperatura, o módulo de Young e a tensão de cedência sofrem redução, originando a movimentação do centro de gravidade para o lado mais frio, tal facto cria um momento de flexão adicional, que é oposto ao momento de origem térmica, obrigando a coluna a movimentar-se para o lado oposto à fonte de calor.

Na figura 5.1 a) e b) podem visualizar-se as tensões de Von Mises para o instante de 20 minutos, para as duas orientações distintas do pilar, relativamente à parede, onde se pode observar a deformação do pilar para o lado não aquecido.

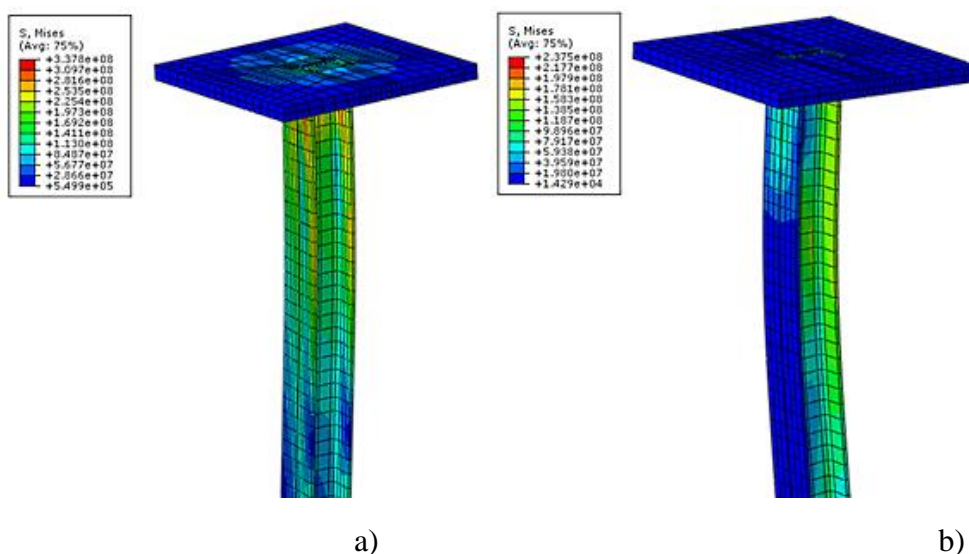


Figura 5.1- Tens após o ensaio a) alma paralela à parede b) alma perpendicular à parede

No presente estudo foi possível observar o comportamento do pilar de aço quando inserido em paredes. Para o estudo analítico do fenómeno são possíveis duas abordagens: ou se considera uma redução da secção transversal na parte aquecida do perfil, ou se considera a tensão plástica, reduzindo para isso a tensão de cedência através dos coeficientes de redução com o aumento da temperatura definidos no Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010).

5.2.3 Evolução das deformadas

No gráfico 5.7 a) e b) representam-se a evolução das deformadas dos pilares, para os casos da orientação do perfil com a alma paralela e perpendicular à parede respetivamente. Em ambos os casos, o aquecimento foi realizado do lado direito dos gráficos.

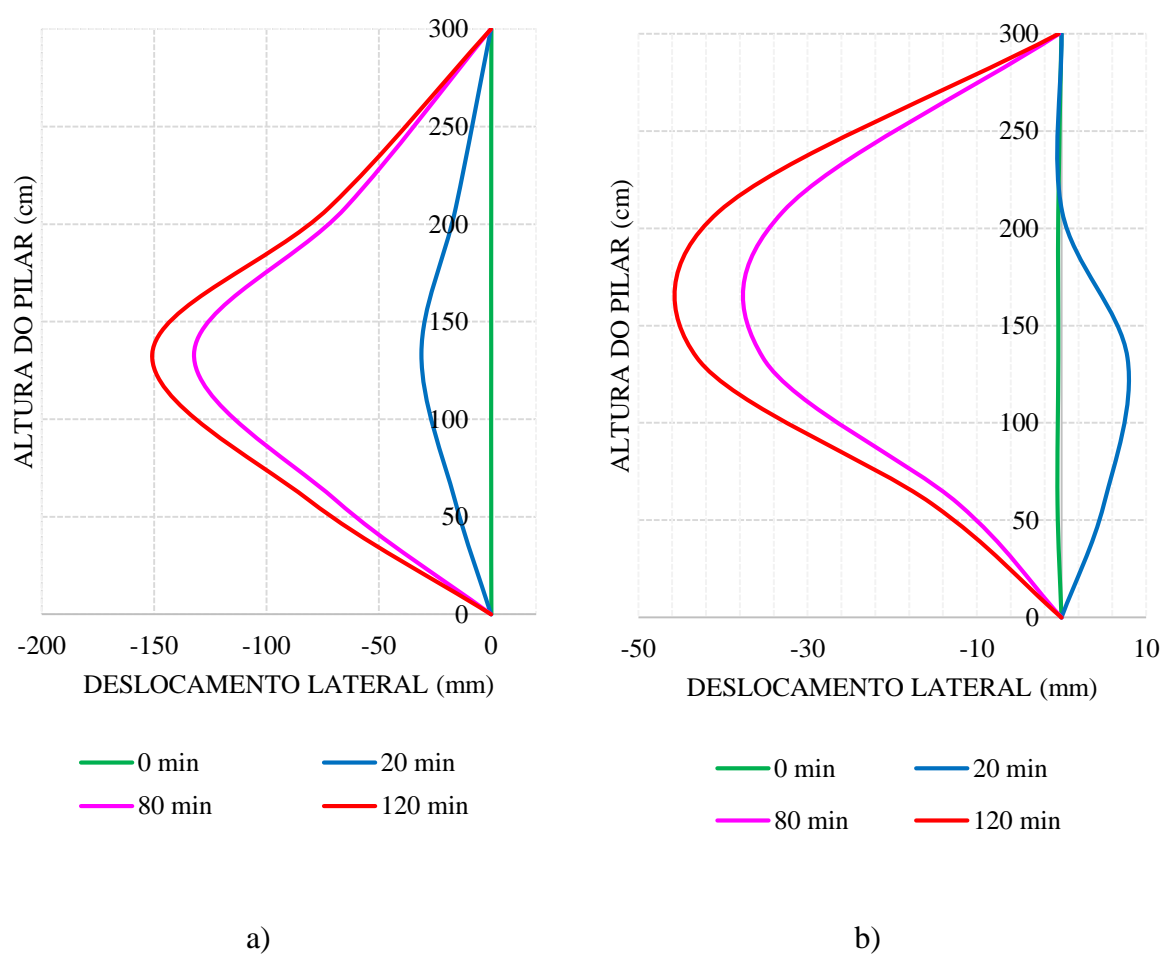


Gráfico 5.7 - Evolução das deformadas dos pilares ao longo do tempo a) alma paralela b) alma perpendicular

Da análise pormenorizada dos gráficos, destaca-se o deslocamento lateral inicial no sentido da fonte de calor, onde decorridos os primeiros minutos se dá uma inversão desse deslocamento, dirigindo-se depois no sentido oposto ao fogo, até ao final do ensaio. Pode visualizar-se que a inversão do deslocamento se dá num período mais curto para a situação em que a alma se

encontra paralela à parede do que na situação da alma perpendicular. Também se verifica que os deslocamentos são maiores, em valor absoluto, no caso dos pilares com a alma paralela à parede.

A inversão dos deslocamentos observada é conhecida por “*Thermal Bowing*”, fenómeno que tem sido descrito e objeto de estudo por vários autores, sendo causado pelo aquecimento diferencial das secções, gerando uma inversão dos momentos fletores. Nas figuras 5.2 e 5.3, são apresentadas ilustrações retiradas do programa ABAQUS, onde se mostram as evoluções de temperaturas e deformações observadas no perfil de aço.

Na figura 5.2 pode visualizar-se para o instante de tempo de cinco minutos o deslocamento lateral do pilar de aço no sentido da fonte de calor (denota-se ligeira “barriga” para o lado direito), atingindo nesse instante aproximadamente o seu deslocamento máximo nesse sentido, invertendo a partir desse momento o seu deslocamento como se pode verificar nos minutos seguintes.

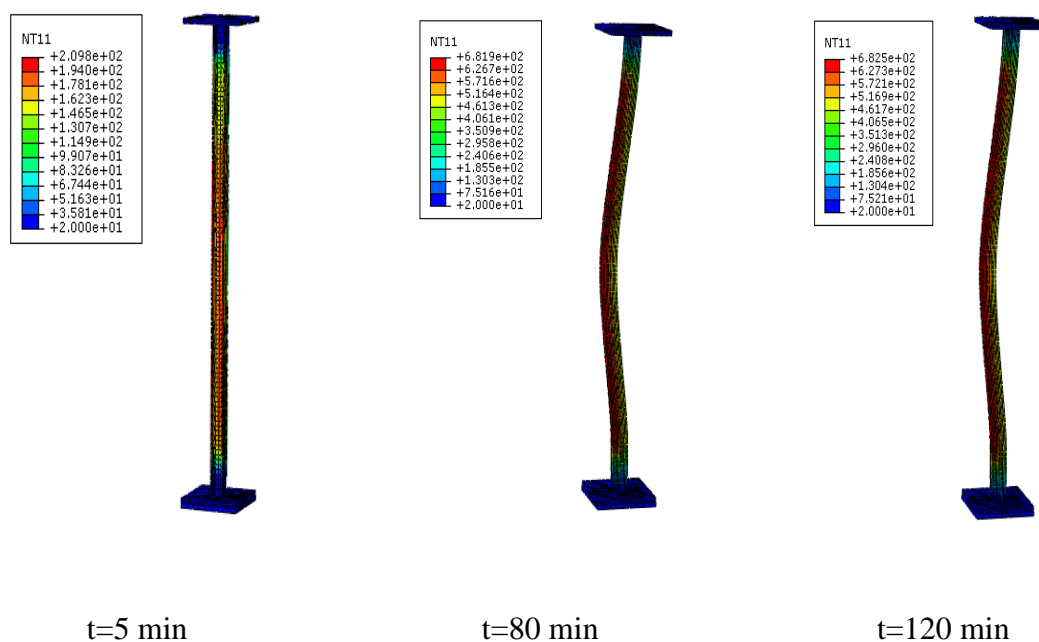


Figura 5.2 - Evolução de temperaturas e deformada do pilar - simulação do ensaio PAR-K13-LL30

Na figura 5.3 pode observar-se para o instante de tempo de cinco minutos o deslocamento lateral do pilar de aço no sentido da fonte de calor, atingindo nesse instante aproximadamente o seu deslocamento máximo nesse sentido, invertendo a partir desse momento o seu deslocamento como se pode verificar nos minutos seguintes.

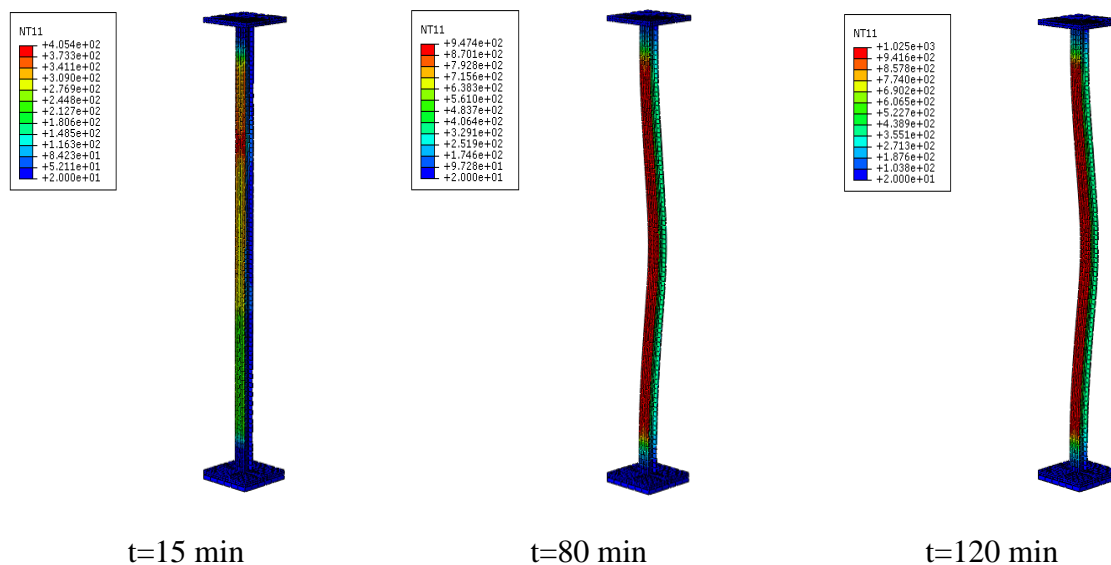


Figura 5.3 - Evolução de temperaturas e deformada do pilar - simulação do ensaio PER-K13-LL30

Torna-se relevante um outro facto na observação das figuras anteriores, no caso do perfil com a orientação da alma perpendicular à parede, as temperaturas elevadas apenas se verificam no banzo exposto e numa extensão muito reduzida da alma. Contudo, verificou-se ao longo deste estudo que o efeito “*Thermal Bowing*”, em alguns aspetos foi mais severo no caso do pilar com a orientação mencionada. Esta ilação demonstra que os efeitos desse fenómeno não dependem apenas dos valores de temperatura atingidos pelo pilar durante o incêndio, mas também das condições em que está inserido na estrutura, ou seja, das suas condições de fronteira.

No anexo VI estão presentes imagens retiradas do programa ABAQUS, que permitem visualizar a evolução das deformadas, nos diferentes instantes de tempo (0, 20, 40, 60, 80, 100 e 120 min.), para os dois casos de estudo de pilar inserido em paredes.

5.2.4 Redução da secção transversal ou Evolução das características geométricas

Considerou-se para a evolução do estudo, a redução da secção transversal na parte aquecida.

O comportamento da coluna foi calculado considerando a redução da área dos elementos que ultrapassaram os 400°C , para os diferentes instantes (0, 20, 40, 60 e 80 min.) utilizando os fatores de redução da tensão de cedência efetiva relativamente à tensão de cedência a 20°C , em função da temperatura dos elementos (quadros 5.2 e 5.3). As tensões de cedência são uniformes ao longo dessa área.

No quadro 5.4, são apresentados os valores dos fatores de redução das secções do elemento, consoante a sua temperatura.

Quadro 5.4 - Redução dos fatores da tensão de cedência efetiva em relação à tensão de cedência a 20°C, em função da temperatura (EN 1993-1-2-2010)

Temperatura (°C)	20-400	500	600	700	800	900	1000
$k_{y,\theta}$	1	0,78	0,47	0,23	0,11	0,06	0,04

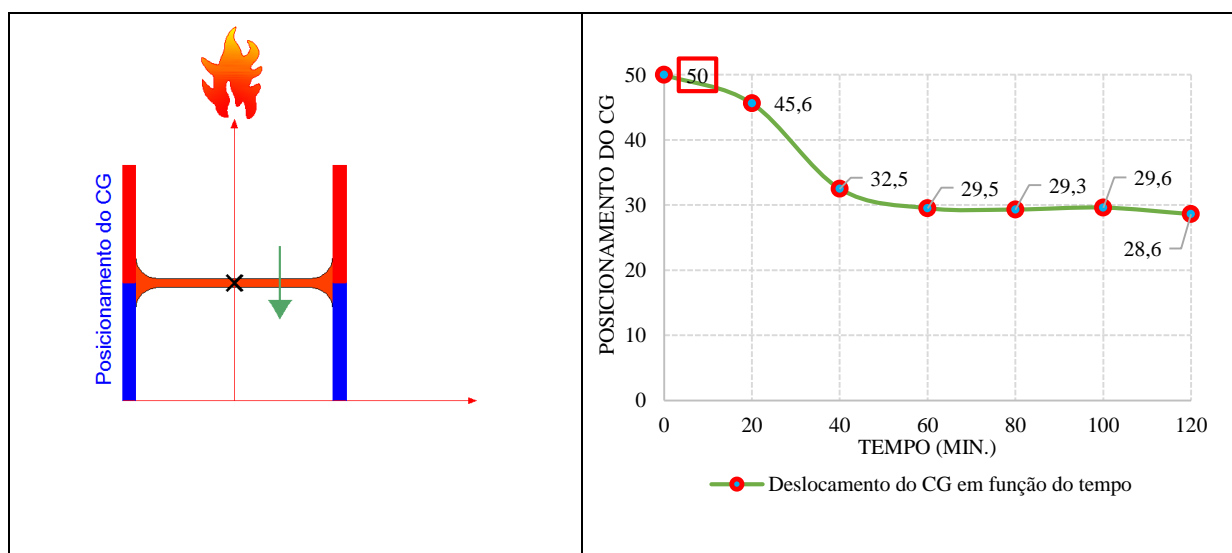
Importa referir que como as temperaturas nos elementos não são valores exatos, procedeu-se a uma interpolação para se obter o factor de redução exato.

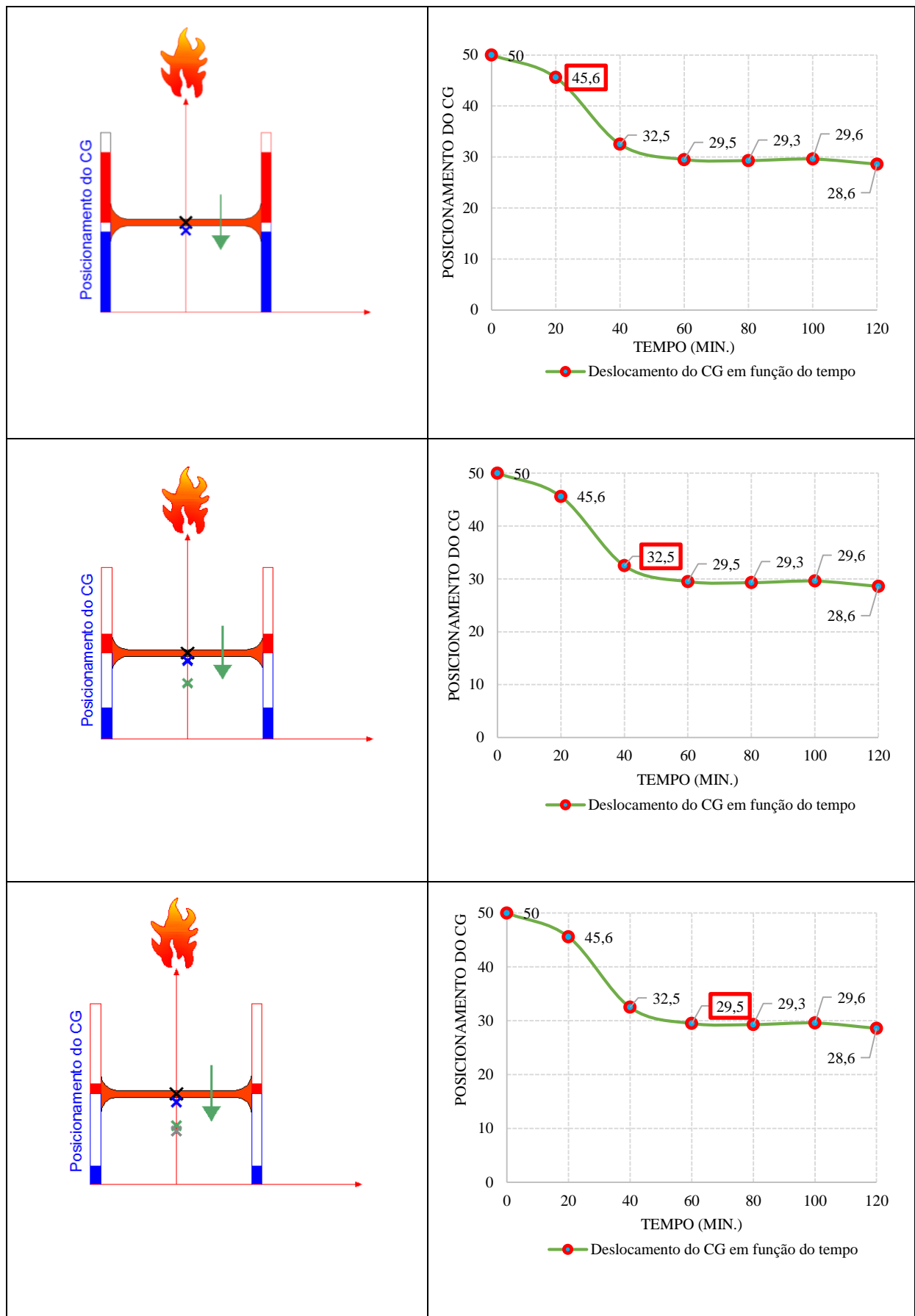
5.2.4.1 Coluna com a alma paralela à parede

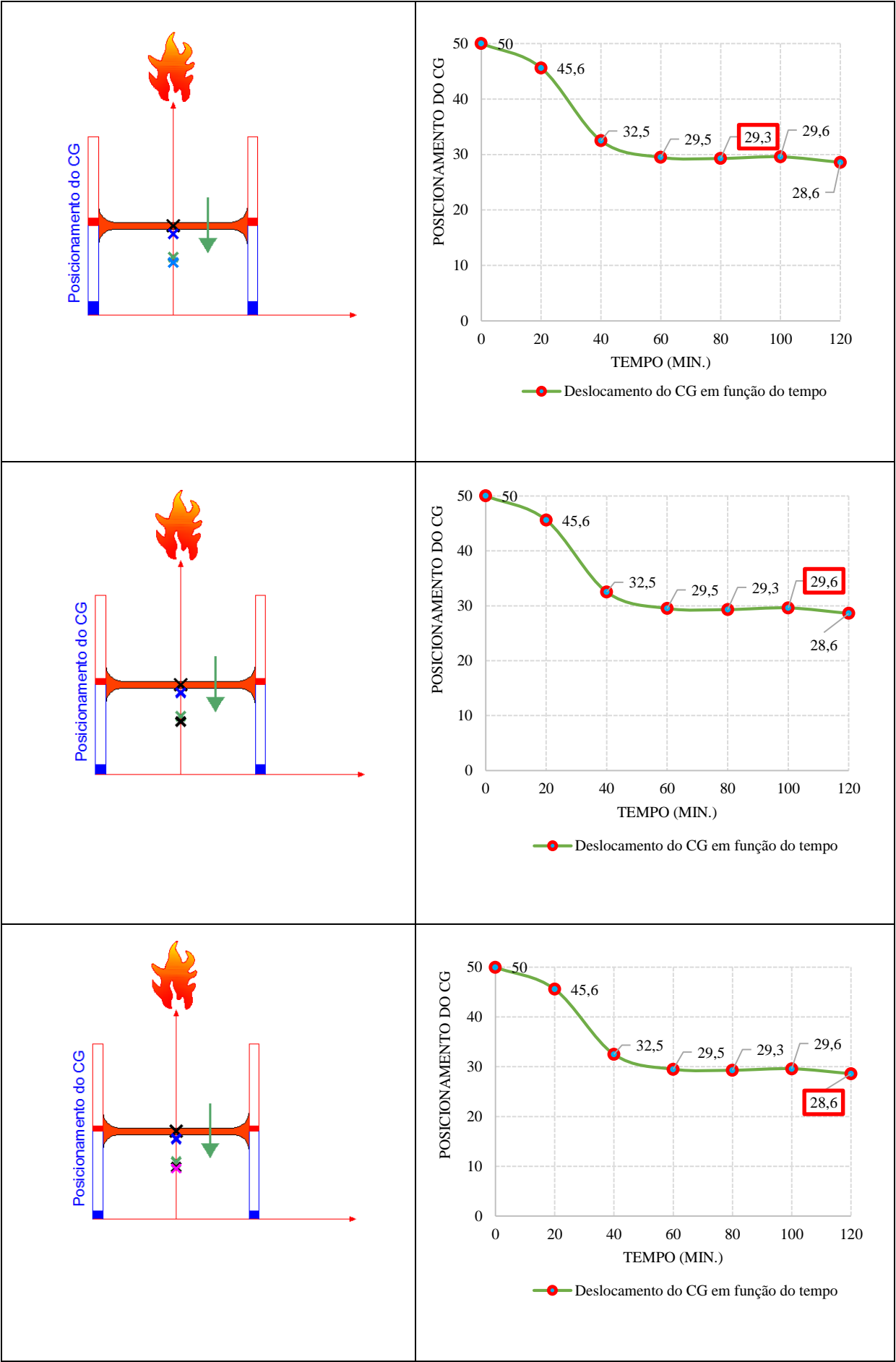
Na avaliação do caso com a alma paralela à parede, foi considerada a secção transversal à temperatura ambiente, utilizando-se os fatores de redução, aplicados aos meios banzos expostos, meios-banzos não expostos e alma, para as temperaturas superiores a 400°C.

No quadro 5.5 apresentam-se as diferentes posições do centro de gravidade em função do aumento da temperatura, ilustrando-se a secção do pilar e o gráfico respeitante à evolução no tempo do posicionamento do centro de gravidade.

Quadro 5.5 - Análise do deslocamento do Centro de Gravidade devido ao aumento da temperatura para o perfil com a alma paralela à parede (gradiente térmico ao longo da alma)







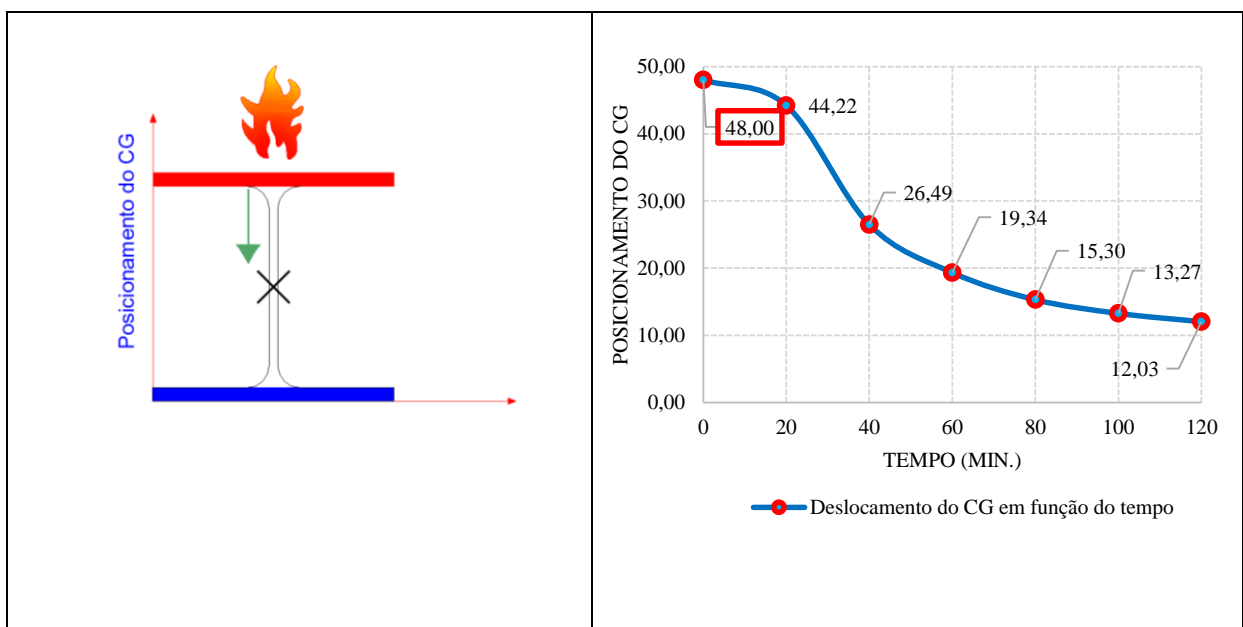
Pela análise dos gráficos e diagramas anteriores pode observar-se a variação da posição do centro de gravidade da secção ao longo do tempo (20 em 20 minutos). Observa-se que existe um afastamento considerável do centro de gravidade da zona aquecida do perfil de aço, deslocando-se para o lado não aquecido, em virtude da perda de resistência da tensão de cedência do aço ao longo do ensaio. Este fenómeno é bastante relevante para explicar o fenómeno de “*Thermal Bowing*”, sendo responsável pela inversão dos momentos fletores que ocorrem na coluna.

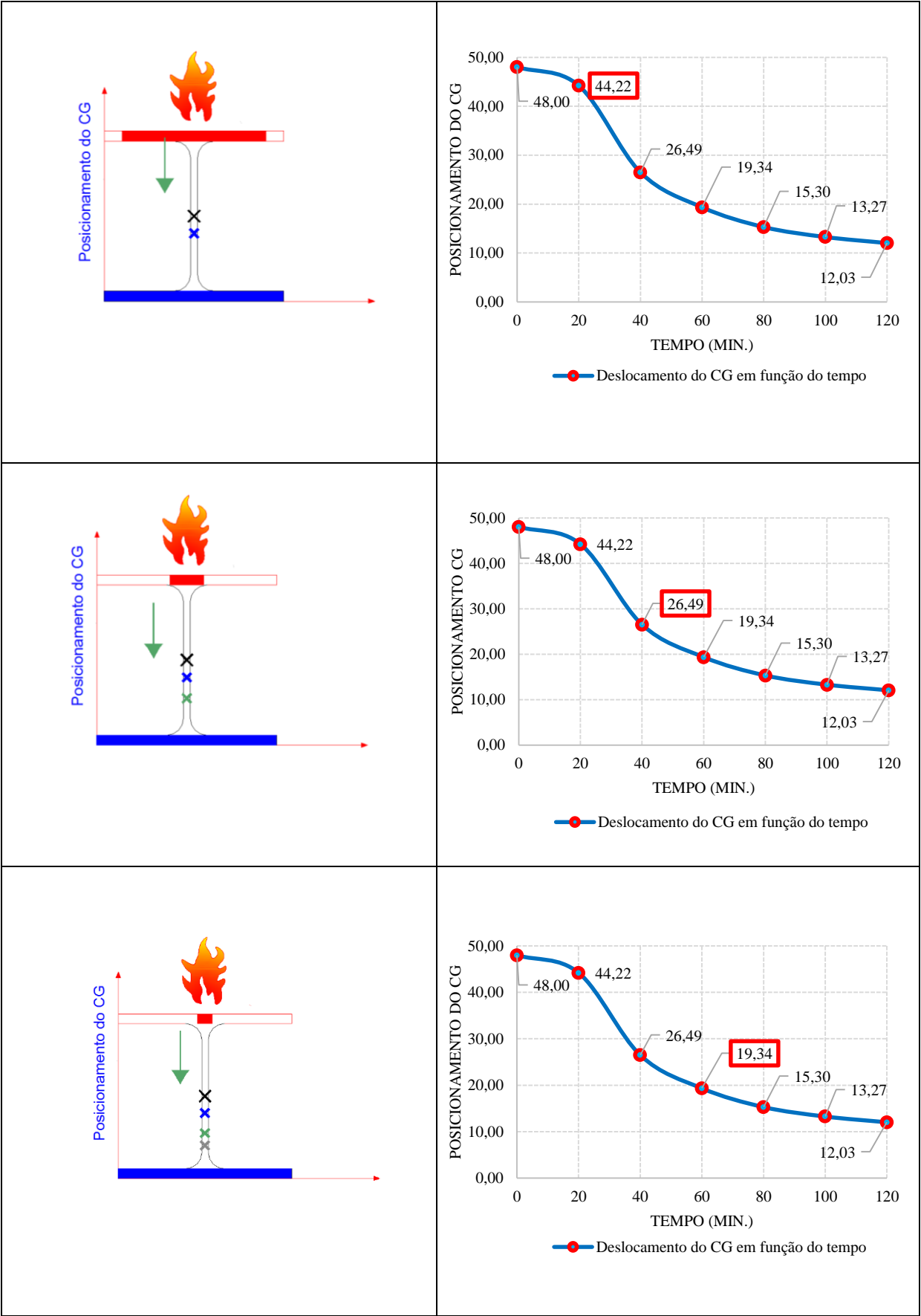
5.2.4.2 Coluna com a alma perpendicular à parede

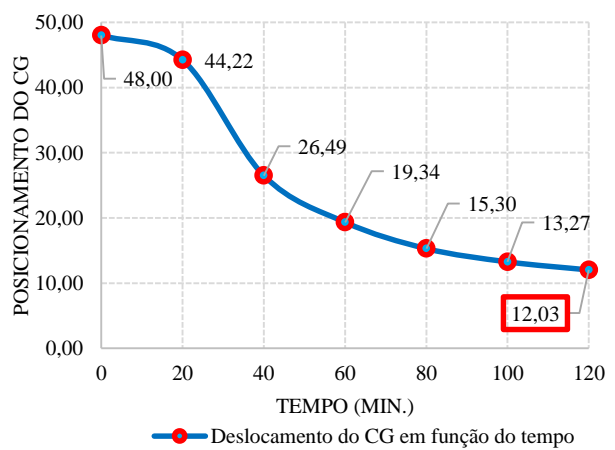
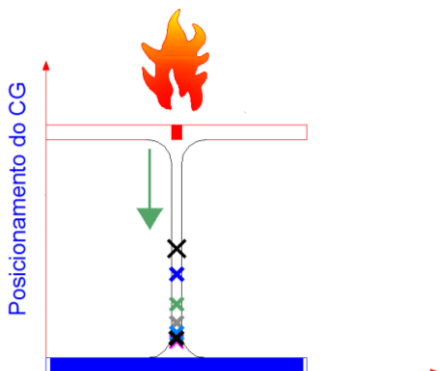
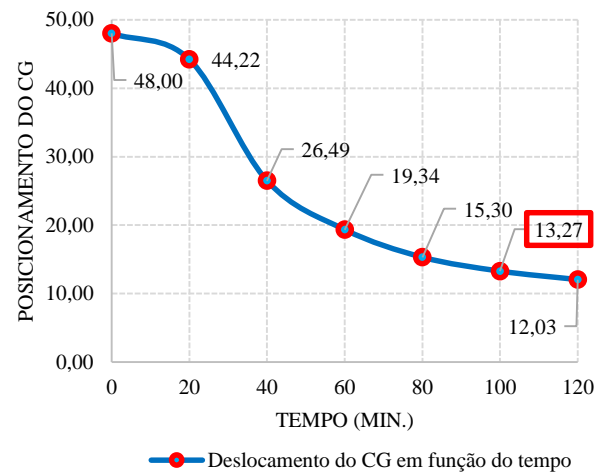
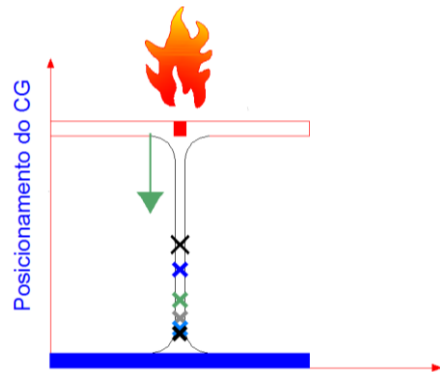
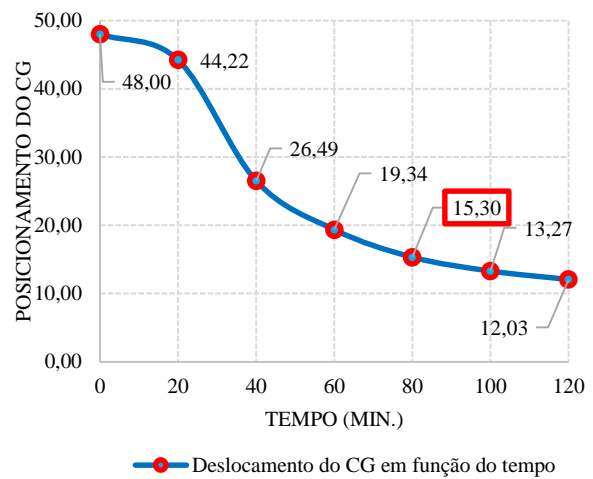
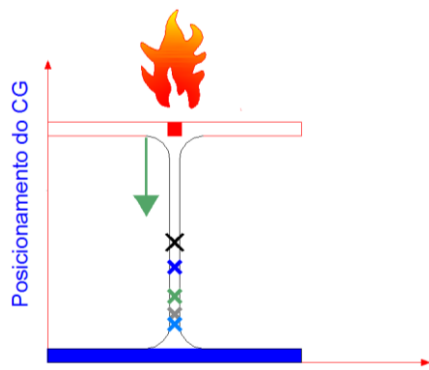
No caso do pilar com a alma perpendicular à parede será igualmente considerada uma secção transversal à temperatura ambiente, utilizando-se os mesmos fatores de redução, aplicados aos diferentes elementos: banzo expostos, banzos não expostos e alma, para as temperaturas superiores a 400°C.

O quadro 5.6 evidencia as diferentes posições do centro de gravidade em função do aumento da temperatura, ilustrando-se a secção do pilar e o gráfico respeitante à evolução no tempo do posicionamento do centro de gravidade.

Quadro 5.6 - Análise do deslocamento do Centro de gravidade devido ao aumento da temperatura para o perfil com a alma perpendicular à parede (gradiente térmico ao longo do banzo)







Pela análise dos gráficos e diagramas anteriores pode observar-se a variação da posição do centro de gravidade da secção ao longo do tempo (20 em 20 minutos). Conclui-se que existe um afastamento considerável do centro de gravidade inicial do perfil, afastando-se do banzo aquecido do perfil de aço. Verifica-se também uma aproximação deste ponto, do banzo não aquecido do perfil. De igual modo, teremos neste caso uma secção não simétrica, tendo como principal consequência a inversão dos momentos fletores no pilar, ao longo do ensaio.

5.2.5 Redução da Tensão de Cedência

A título ilustrativo, apresenta-se nesta secção a outra abordagem possível para o estudo analítico do fenómeno do “*Thermal Bowing*”. Neste método, as secções mantêm-se com a área geométrica inicial, e considera-se nas várias partes da secção transversal uma redução da tensão de cedência em função da temperatura.

5.2.5.1 Coluna com a alma paralela à parede

Neste caso a redução da tensão de cedência é aplicada aos meios banzos aquecidos. Dessa forma, a figura 5.5 a) $M/M_{pl} = 0$ e N/N_{pl} é máximo, na figura 5.5 b) $N/N_{pl} = 0$ e M/M_{pl} é máximo. A posição do eixo neutro plástico (situação da figura 5.5 b)) é calculado sob a condição em que a compressão resultante é igual à resultante da tensão na secção transversal à temperatura ambiente.

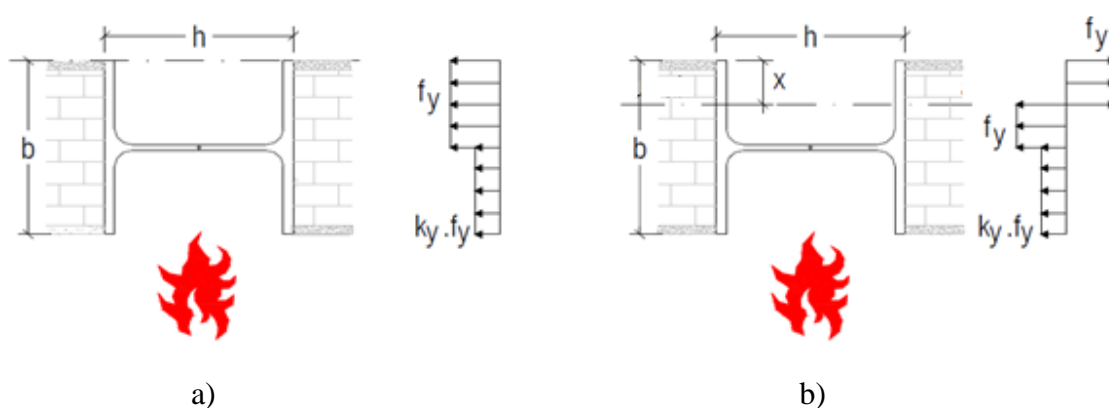


Figura 5.4 - Diagramas de tensões para os perfis de aço sujeitos ao aquecimento diferencial, no caso de um perfil com a alma paralela à parede (gradiente térmico ao longo da alma)

5.2.5.2 Coluna com a alma perpendicular à parede

Aplica-se uma redução da tensão de cedência no banzo aquecido. Na figura 5.4 a) apresenta-se o diagrama de compressão pura, na figura 5.4 b) ocorre flexão pura, dependendo da posição do eixo neutro plástico (x representa a distância entre o eixo neutro plástico e o centro de gravidade).

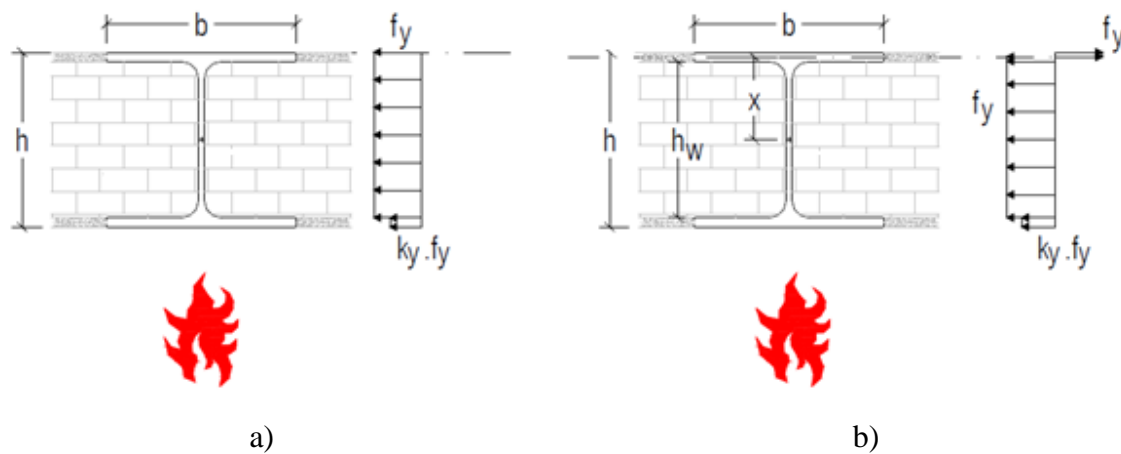


Figura 5.5 - Diagramas de tensões para os perfis de aço sujeitos ao aquecimento diferencial, no caso de um perfil com a alma perpendicular à parede (gradiente térmico ao longo do banzo)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Considerações finais

O estudo de resistência ao fogo dos pilares de aço inseridos em paredes mostra-se bastante atrativo, no sentido de perceber a estabilidade de uma estrutura/edifício em situação de incêndio.

A realização deste trabalho, englobando o conjunto dos ensaios experimentais e das simulações numéricas, veio confirmar uma vez mais o fenómeno de inversão de deslocamentos laterais e de momentos fletores, que é típico em elementos estruturais sujeitos a aquecimento diferencial. Esse comportamento dos pilares foi claramente observado nos ensaios experimentais, bem como, nas simulações numéricas realizadas. Este fenómeno tem sido estudado e defendido por alguns autores, sendo que ainda continua a ser desconhecido para um grande número de investigadores nesta área. Verificou-se que o gradiente térmico na secção transversal dos pilares é responsável pelo aparecimento deste fenómeno, denominado por “*Thermal Bowing*”.

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho foi a inexistência de estudos que abordassem a resistência ao fogo dos pilares de aço, com secção transversal H, inseridos numa estrutura real, no sentido de se compreender melhor o comportamento dos mesmos quando sujeitos à ação do fogo de um só lado, ou em toda a sua envoltória.

Para a clara perceção do problema, o desenvolvimento deste trabalho exigiu inicialmente uma recolha teórica que incidiu principalmente nos seguintes temas:

- Análise e compreensão de estudos e publicações relacionados com trabalhos de resistência ao fogo de pilares metálicos;
- Abordagem à teoria do Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010);
- Realização de ensaios experimentais em laboratório sobre o comportamento estrutural destes pilares em situação de incêndios;
- Modulação numérica pelo método dos elementos finitos, (MEF);
- Estudo paramétrico variando o nível de carregamento do pilar.

6.2 Principais conclusões

Deste trabalho experimental e numérico puderam retirar-se as seguintes conclusões:

Gradientes térmicos

Os gradientes térmicos observados na secção transversal dos pilares são mais elevados no caso dos pilares com a alma perpendicular à parede. Contudo, é nos casos do perfil com a alma

paralela que as temperaturas médias na secção são mais elevadas, pois neste caso o perfil fica mais exposto.

No subcapítulo 4.4.1.4 pode observar-se a análise deste parâmetro, onde se verificam elevados gradientes térmicos no caso do pilar com a alma perpendicular à parede de alvenaria, entre o banzo exposto e não exposto ao aquecimento.

Deslocamentos Laterais

Verificou-se o deslocamento lateral em ambos os casos, numa fase inicial na direcção da fonte de calor, sendo depois invertido o seu sentido e ultrapassada a sua posição inicial, situação que se tornou mais evidente para o caso em que a alma do pilar se encontra perpendicular à parede.

Esforço axial nas várias partes da secção

Para ambas as orientações dos pilares relativamente às paredes de alvenaria, verificou-se um esforço axial superior na zona dos banzos não expostos ao fogo, situação que apenas não se verifica para o caso do perfil com a alma perpendicular à parede de alvenaria, níveis de carregamento de 90% e 100%. Comparativamente ao esforço axial entre a alma e banzos, para o pilar com a alma paralela à parede, verifica-se que existe uma maior solicitação de esforço axial da alma do que para o caso do pilar com a alma perpendicular à parede, em que para todos os níveis de carregamento a contribuição do esforço axial da alma foi sempre mais reduzida comparativamente com os banzos.

No subcapítulo 4.4.2 foi realizada uma análise exaustiva do esforço axial nas várias partes da secção.

Forças de restrição

As forças de restrição axiais observadas têm maior valor no caso do perfil com a alma paralela à parede de alvenaria, provocadas pelo maior aquecimento da secção transversal do pilar de aço conduzindo, assim, a uma maior dilatação térmica do pilar.

Dentro das mesmas condições de carregamento e de orientação da secção relativamente às paredes, observou-se uma diminuição do pico das forças de restrição com o aumento do nível de carregamento.

Esta diminuição das forças de restrição traduz a gradual perda de resistência do pilar ao longo do ensaio e do período de aquecimento. Foi possível verificar que essa perda de resistência no caso do pilar com a alma perpendicular à parede, é bastante mais lenta que no caso do pilar com alma paralela

Calibração dos modelos numéricos

O desenvolvimento e construção dos modelos numéricos utilizados neste trabalho foram realizados com o máximo de rigor, por forma a reproduzir nas simulações numéricas as condições semelhantes às que decorreram nos ensaios experimentais. Os resultados após a calibração dos modelos foram satisfatórios, tendo-se verificado uma aceitável concordância relativamente aos resultados obtidos via numérica e experimental, principalmente em termos de temperaturas e forças de restrição. Tal conclusão, permite concluir que estes modelos são adequados para sustentar futuros estudos paramétricos de análise dos parâmetros intervenientes neste fenómeno.

Critério de rotura dos pilares

Outro aspeto que é digno de nota, no final deste trabalho, é que não será adequado o critério de rotura destes pilares inseridos em paredes, como sendo o instante de tempo em que o esforço axial, após aumentar e atingir um pico, volta a igualar o valor inicial. De facto, pode observar-se que a fase de decréscimo dos esforços axiais de origem térmica segue curvas bastante diferentes, umas mais suaves que outras, conforme pode observar-se nos gráficos que traduzem as curvas de evolução das forças de restrição P/P_0 , em função do tempo, para as duas orientações estudadas.

Em termos de resistência ao fogo dos pilares estudados, a principal conclusão deste estudo paramétrico foi que a resistência ao fogo dos pilares inseridos em paredes foi sempre maior do que a resistência ao fogo dos pilares totalmente envolvidos pelas chamas.

Evolução das características geométricas

Ao nível da evolução das características geométricas, o estudo permitiu concluir que o deslocamento do centro de gravidade é mais brusco para o caso do pilar com a alma perpendicular à parede de alvenaria. Sobre este tema, conclusões mais abrangentes estão dependentes de mais estudos sobre este deslocamento do centro de gravidade.

6.3 Desenvolvimentos futuros

Espera-se que o presente trabalho traga uma contribuição para o melhoramento do estudo de resistência ao fogo das estruturas metálicas.

No entanto, continua a existir a necessidade de uma avaliação mais profunda do comportamento de pilares inseridos em edifícios sujeitos a diferentes gradientes térmicos. As vias numérica e experimental continuam a ser meios de extremo valor na obtenção de resultados para avaliação da influência de todos os parâmetros intervenientes neste fenómeno.

Nesse sentido, são vários os pontos que poderão contribuir para aprofundar o tema deste estudo, tais como:

- Avaliação do comportamento de pilares de aço com outro tipo de secções transversais;
- Variação da disposição dos pilares de aço em relação à parede de alvenaria, tais como, por exemplo, pilares de canto;
- Variação da esbelteza do pilar de aço, variando o comprimento e o grau de encastramento nas extremidades;
- Desenvolvimento de um fator de forma capaz de ter em conta o comportamento de pilares metálicos sujeitos a gradientes térmicos;
- Dar continuidade aos ensaios experimentais por forma a analisar e compreender de forma mais pormenorizada a inversão de momentos e rotações nas extremidades do pilar;
- Avaliação do comportamento entre as extremidades do pilar e a ligação à estrutura circundante causada pelas rotações e inversões de momentos causadas pelo fenómeno do “*Thermal Bowing*”;
- Avaliação detalhada da influência da restrição axial e rotacional causada pela estrutura circundante, no comportamento deste tipo de pilares, de preferência tentando separar as duas rigidezes;
- Avaliação do comportamento de pilares de aço inseridos em paredes constituídas por outro tipo de materiais isolantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. ABAQUS/standard version 13.1 user's manual: volumes I-III. Pawtucket, Rhode Island: Hibbit, Carlsson & Sorensson, Inc.; 2010.

Anil Agarwal (2014), "Fire design of steel columns: Effects of thermal gradients", Journal of Constructional Steel Research 93 (2014) 107–118.

Babrauskas e Willianson (1790), "the 1st fire resistance tests on steel columns", EUA, 1790.

Cooke, G.M.E., (1998). "Thermal Bowing and how it effects the design of fire separating construction", Proceedings of the Interflamm'88, 230-236, London.

Correia A.M., Rodrigues J.P.C., Silva V.P. (2009a). "Experimental research on the fire behavior of steel columns embedded on walls". Application of Structural Fire Engineering, Prague, Czech Republic.

Correia A.M., Rodrigues J.P.C., Silva V.P.; (2009b). "Comportamento termomecânico de pilares de aço inseridos em paredes em caso de incêndio", VII Congresso CMM – Construção Metálica e Mista, Lisboa.

Correia A.M., Rodrigues J.P.C., Silva V.P.; (2010 a). "Numerical Study on the Behavior of Steel Columns Embedded on Brick Walls Subjected to fire"; International Symposium "SSCS 2010 – Steel Structures: Culture & Sustainability 2010", Istambul, Turkey.

Correia A.M., Rodrigues J.P.C., Silva V.P. (2010b). "A Simplified Calculation Method for Temperature Evaluation of Steel Columns Embedded in Walls"; Fire and Materials, DOI:10.1002/fam.1063.

Correia, A., Rodrigues, J (2011a). "Fire Resistance of Steel Columns with Restrained Thermal Elongation", Fire Safety Journal, vol.67, pp593-601.

Correia, A., (2011b). "Fire Resistance of Steel and Composite Steel-Concrete Columns", PhD Thesis, Universidade de Coimbra, 2011.

Correia, A., Rodrigues, J (2012a). “Experimental and Numerical Tests on Building Steel Columns Subjected to fire”, 7th International Conference on Structures in Fire- SIF`2012, Zurich, Switzerland, 6-8 June 2012.

Correia, A., Rodrigues, J (2012b). “Parametric Study on the Behavior of steel columns embedded on walls”, 7th International Conference on Structures in Fire- SIF`2012, Zurich, Switzerland, 6-8 June 2012.

Dwaikat, M.M.S. (2012), “Effect of the stochastic nature of the constituents parameters on the predictability of the elastic properties of fibrous nano-composites”, Composites Science and Technology 72 (2012) 1882–1891

Eurocódigo 3 – Parte 1.1 (EN 1993-1-1:2010), “Eurocódigo 3 – Dimensionamento de estruturas de aço, Parte 1.1: Regras gerais de conceção estrutural de resistência ao fogo ”. CEN, Brussels.

Eurocódigo 3 – Parte 1.2 (EN 1993-1-2:2010), “Eurocódigo 3 – Dimensionamento de estruturas de aço, Parte 1.2: Regras gerais de conceção estrutural de resistência ao fogo ”. CEN, Brussels.

Eurocódigo 4 - (EN 1994-1-1:2011), “Eurocode 4 – design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium, Comité Européen de Normalisation.

Garlock, M., Quiel, S.E., (2006), “Combined axial load and moment capacity of fire-exposed beam-columns with thermal gradients”, Proc. 4th International Workshop for Structures in Fire (SIF `06), Vol. I, University of Aveiro, 187-198 Portugal.

Guimarães, P. (2007). “Dimensionamento do revestimento de resistência ao fogo de estruturas de aço”. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Garlock, M., Quiel, S.E., (2008). “Plastic Axial Load and Moment Interaction Curves for Fire-Exposed Steel Sections with Thermal Gradients”. Journal of Structural Engineering. pp. 874-880.

ISO 834, (1975) “Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Johann Bauschinger (1884), “International materials testing specialists”, Munich, 1884.

Kimura, E. (2009a). “Análise Termo estrutural de Pilares de Aço em Situação de Incêndio” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Kimura, E., Neto, J., Silva, V. (2009b). “Análise Numérica de Pilares de Aço em Situação de Incêndio Considerando os Efeitos da Compartimentação em Ambiente em Chamas” *Minerva*. vol. 6, Issue 2, pp. 127-137.

Landesmann, A., Batista, E., Alves, J. (2005). “Implementation of Advanced Analysis Method for Steel-Framed Structures Under Fire Conditions”. *Fire Safety Journal*. vol. 40, pp. 339-366.

Muller and Luhmann (1887), “heating and cooling cycle of the steel columns”, Alemanha, 1887.

NBR 14323-JUN (1999), “Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio”, Brasil, 1999.

Quiel, S., Garlock, M. (2008). “Parameters for Modeling a High-Rise Steel Building Frame Subject to Fire”. *Journal of Fire Engineering*. vol. 1 pp. 114-134.

Quiel, S., Garlock, M., Paya-Zaforteza, M. (2011). “Closed-Form Procedure for Predicting the Capacity and Demand of Steel Beam-Columns under Fire”. *Journal of Structural Engineering*. vol. 137, pp. 967-976.

Silva, V. (2006). “Determination of the Temperature of Thermally unprotected Steel Members under Fire Situations: considerations on the Section Factor”, *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 3, pp 113-125.

Tan K.H., Toh W.S., Huang Z.F., Phng G.H. (2007). “Structural responses of restrained steel columns et elevated temperatures. Part 1: Experiments”. *Engineering Structures* 29,1641-1652.

Tsalikis, C. T., Koltsakis, E.K., Baniotopoulos, C.C.(2011), “Elastic Buckling of steel columns under thermal gradient”, *Proc. of 2 Application of Structure Fire Engeneering*, 2011, Czech Republic.

Usmani, A.S., Rotter, J. M., Lamont, S., Sanad, A.M., Gilie, M. (2001 “Fundamental principles of structural behavior under thermal effects” Fire Safety Journal (36), 721-744.

Vila Real, Paulo M. M., Incêndio em Estruturas Metálicas – Cálculo Estrutural. s.1 Orion, 2003.

Valdir Pignalta e Silva. “Determination of the temperature of thermally unprotected steel members under fire situations: considerations on the section factor”. Latin American Journal of Solids and Structures, (2006).

Wang, Y. C. (2000), “An analysis of the global structural behaviour of the Cardington steel-framed building during the two BRE fire tests”, Engineering Structures 22:401-412.

Wald, F., Chlouba, J., Uhlir A., Kallerová, P., Stujberová. (2009). “Temperatures During Fire Tests on Structure and its Prediction According to Eurocodes” M. Fire Safety Journal, vol. 44, pp. 135-146.

Wang, W., Li, G. (2009) “Behavior of Steel Columns in a Fire With Partial Damage to Fire Protection”. Journal of Constructional Steel Research. vol. 65, pp. 1392-1400.

Bibliografia de Imagens

[1]<http://photos1.blogger.com/blogger/2113/828/1600/Fogo%20na%20Torre%20Windsor%2010.jpg>

[2]<http://fotografia.folha.uol.com.br/galerias/4327-edificio-joelma#foto-80840>

7. ANEXOS

7.1 Anexo I - Caracterização geométrica do perfil HEA 100

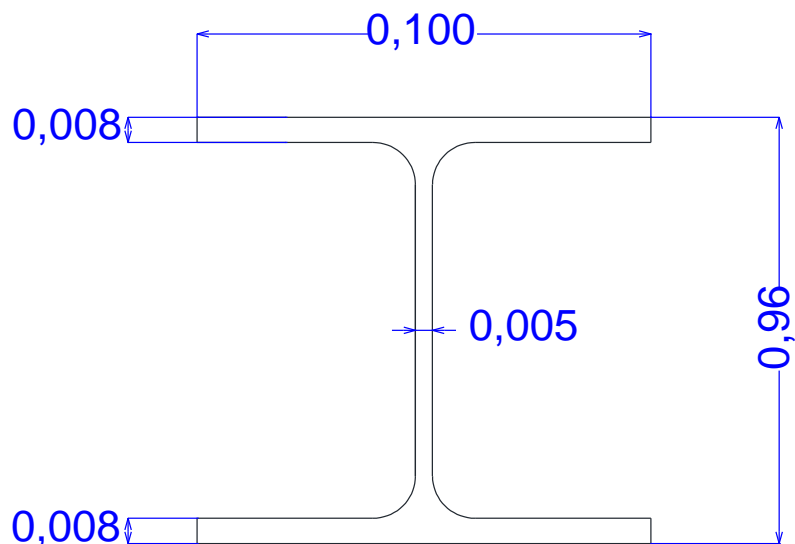


Figura 7.1 - Definição geométrica do perfil HEA 100

No quadro seguinte (7.1), apresentam-se as informações técnicas dos perfis de aço HEA 100.

Quadro 7.1 - Informações técnicas dos perfis de aço HEA 100

Desig- nação	Massa Kg/m	Área cm²	Dimensões (mm)					Características referidas aos eixos						Mome nto de inércia à torção <i>J_t</i> cm⁴	Área a pintar A _p m²/m
								x-x			y-y				
			h	b	a	e	r	I _x cm 4	W _x cm 3	i _x cm	I _y cm 4	W _y cm 3	i _y cm		
HEA10 0	16,7	21,2	9 6	10 0	5	8	1 2	349	73	4,0 6	134	27	2,5 1	5,24	0,561

7.2 Anexo II – Desenvolvimento fotográfico dos ensaios experimentais

Fotografias dos ensaios experimentais.



Figura 7.2 - Rebarbagem para correta soldagem dos termopares



Figura 7.3 - Todas as zonas de colocação dos termopares rebarbadas



Figura 7.4 - Vista da instrumentação do pilar isolado



Figura 7.5 - Pormenor da instrumentação do pilar isolado



Figura 7.6 - Vista global da colocação do pilar isolado no forno

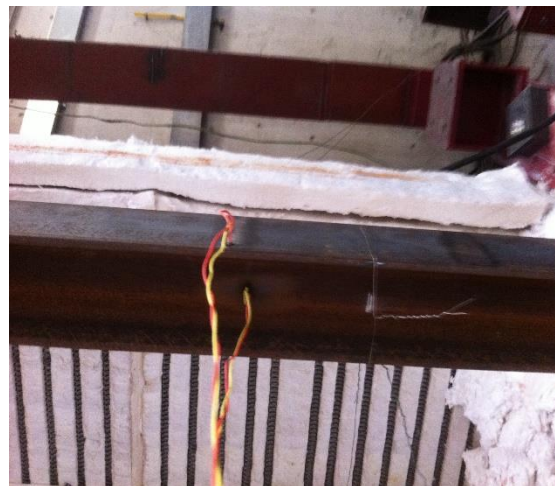


Figura 7.7 - Pormenor de colocação dos termopares – 1



Figura 7.8 - Pormenor de colocação dos termopares – 2



Figura 7.9 - Pormenor de colocação dos termopares – 3

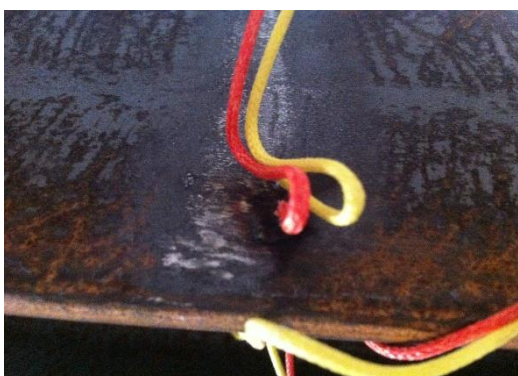


Figura 7.10 - Pormenor de colocação dos termopares – 4



Figura 7.11 - Transdutor de deslocamento - Base



Figura 7.12 - Central servo-hidráulica de controlo do macaco hidráulico

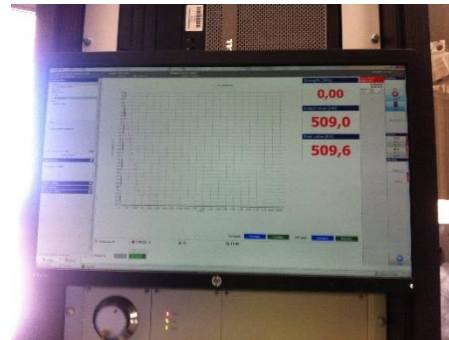


Figura 7.13 - Ecrã da central servo-hidráulica de controlo do macaco hidráulico



Figura 7.14 - Construção das paredes



Figura 7.15 - Pormenor de cortes na parede, para posteriores ancoragens



Figura 7.16 - Transporte das paredes para o pórtico de ensaio - 1



Figura 7.17 - Transporte das paredes para o pórtico de ensaio - 2



Figura 7.18 - Execução de juntas de ancoragem – alma paralela à parede



Figura 7.19 - Isolamento do conjunto de ensaio



Figura 7.20 - Vista global do sistema de ensaio - 1



Figura 7.21 - Vista global do sistema de ensaio - 2



Figura 7.22 - Pormenor de carregamento

Figura 7.23 - Fendas verticais observadas no pilar com a alma paralela



Figura 7.24 - Preparação do ensaio com a alma perpendicular às paredes - 1



Figura 7.25 - Preparação do ensaio com a alma perpendicular às paredes - 2

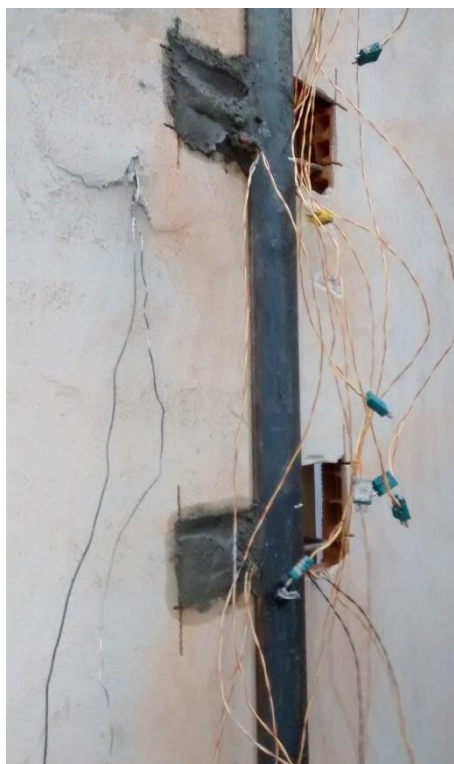


Figura 7.26 - Pormenor da zona de ancoragem, já com a instrumentação



Figura 7.27 - Vista lateral do sistema de ensaio do pilar com a alma perpendicular à parede.



Figura 7.28 - Fendas observadas no pilar com a alma perpendicular à parede



Figura 7.29 - Sistema global

7.3 Anexo III – Marcha de cálculo das cargas de serviço para os diferentes níveis de carregamento

Em seguida apresentam-se os diferentes passos que constituíram a marcha de cálculo das cargas de serviço para os diferentes níveis de carregamento.

Perfil escolhido – HEA 100

$$\text{Área HEA100} = 21,2 \text{ cm}^2 = 2120 \text{ mm}^2$$

$$i_y \text{ HEA100} = 4,06 \text{ cm} = 0,0406 \text{ m}$$

$$i_z \text{ HEA100} = 2,51 \text{ cm} = 0,0251 \text{ m}$$

$$L \text{ do pilar} = 3,00 \text{ m}$$

$$\lambda_y = \frac{h}{i_y} = \frac{3,00}{0,0406} \times 0,7 = 51,72$$

$$\lambda_z = \frac{h}{i_z} = \frac{3,00}{0,0251} \times 0,7 = 83,65$$

$$f_y = 355 \text{ MPa}$$

Para o eixo z

$$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y} \right)^{0,5} = \left(\frac{235}{355} \right)^{0,5} = 0,813617$$

$$\lambda_1 = 93,90 \times \varepsilon = 93,90 \times 0,813617 = 76,39859$$

$$\beta A1 = 1,00 \rightarrow \text{Para secções transversais do tipo 1,2 e 3}$$

$$\lambda_{barra} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \times [\beta A]^{0,5} = \frac{83,65}{76,39859} \times 1,00^{0,5} = 1,095$$

ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Z

Trata-se da curva c de encurvadura.

Quadro 7.2 - Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura

Curva de encurvadura	a0	a	b	c	d
Fator de imperfeição	0,13	0,21	0,30	0,49	0,76

Eurocódigo 3 – Parte 1.1 (EN 1993-1-1:2010)

t_f para o nosso caso é 8mm (tabelas técnicas)

Depois para encontrar os valores - quadro 6.2 do Eurocódigo 3 parte 1-1:2010, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Limites} &= \frac{h}{b} = \frac{96}{100} = 0,96 < 1,2 \rightarrow \text{como } t_f \leq 100 \text{ mm} \rightarrow \text{tratando-se do eixo z} \\ &\rightarrow \text{Tratand} \\ &\text{— se de um S355 obtemos portanto a curva c de encurvadura} \end{aligned}$$

De acordo com o quadro apresentando acima e constante no Eurocódigo 3 parte 1-1:2010, Quadro 6.1, tem-se $\alpha=0,49$.

$$\phi = 0,50 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{\text{barra}} - 0,20) + \lambda_{\text{barra}}^2]$$

$$\phi = 0,50 \times [1 + 0,49 \times (1,095 - 0,20) + 1,095^2] = 1,31879$$

$$X = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \lambda_{\text{barra}}^2]^{0,50}}$$

X tem de ser inferior a 1,00

$$X = \frac{1}{1,31879 + [1,31879^2 - 1,095^2]^{0,50}} = 0,486912$$

$$Y_{M1} = 1,00$$

$$N_{brd} = X \times \beta A \times A \times \frac{f_y}{Y_{M1}}$$

$$N_{brd} = 0,486912 \times 1,00 \times 2120 \times \frac{355}{1,00} = 366450 \text{ N}$$

Níveis de carregamento:

30%

$$Nbrd \times \frac{30}{100} N$$

50%

$$Nbrd \times \frac{50}{100} N$$

70%

$$Nbrd \times \frac{70}{100} N$$

90%

$$Nbrd \times \frac{90}{100} N$$

100%

$$Nbrd \times \frac{100}{100} N$$

O carregamento foi aplicado em quatro pontos.

Para o eixo y

$$\varepsilon = \left(\frac{235}{f_y} \right)^{0,5} = \left(\frac{235}{355} \right)^{0,5} = 0,813617$$

$$\lambda_1 = 93,90 \times \varepsilon = 93,90 \times 0,813617 = 76,39859$$

$\beta A1 = 1,00 \rightarrow$ Para secções transversais do tipo 1,2 e 3

$$\lambda_{barra} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \times [\beta A]^{0,5} = \frac{51,72}{76,3986} \times 1,00^{0,5} = 0,676976$$

ENCURVADURA EM TORNO DO EIXO Y

Trata-se da curva b de encurvadura.

Quadro 7.3 - Fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura

Curva de encurvadura	a0	a	b	c	d
Fator de imperfeição	0,13	0,21	0,30	0,49	0,76

Eurocódigo 3 – Parte 1.1 (EN 1993-1-1:2010)

tf para o nosso caso é 8mm (tabelas técnicas)

Depois para encontrar os valores - quadro 6.2 do Eurocódigo 3 parte 1-1:2010, temos:

$$\text{Limites} = \frac{h}{b} = \frac{96}{100} = 0,96 < 1,2 \rightarrow \text{como } t_f \leq 100 \text{ mm} \rightarrow \text{tratando - se do eixo y}$$

→ Tratando
– se de um S235 obtemos portanto a curva b de encurvadura

De acordo com o quadro apresentando acima e constante no Eurocódigo 3 parte 1-1:2010, Quadro 6.1, tem-se $\alpha=0,34$.

$$\phi = 0,50 \times [1 + \alpha \times (\lambda_{barra} - 0,20) + \lambda_{barra}^2]$$

$$\phi = 0,50 \times [1 + 0,34 \times (0,676976 - 0,20) + 0,676976^2] = 0,810234$$

$$X = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \lambda_{barra}^2]^{0,50}}$$

X tem de ser inferior a 1,00

$$X = \frac{1}{0,810234 + [0,810234^2 - 0,676976^2]^{0,50}} = 0,796552$$

$$Y_{M1} = 1,00$$

$$N_{brd} = X \times \beta A \times A \times \frac{f_y}{Y_{M1}}$$

$$N_{brd} = 0,796552 \times 1,00 \times 2120 \times \frac{355}{1,00} = 599485 \text{ N}$$

Níveis de carregamento:

30%

$$N_{brd} \times \frac{30}{100} N$$

50%

$$N_{brd} \times \frac{50}{100} N$$

70%

$$N_{brd} \times \frac{70}{100} N$$

90%

$$N_{brd} \times \frac{90}{100} N$$

100%

$$N_{brd} \times \frac{100}{100} N$$

O carregamento foi aplicado em quatro pontos, como se pode visualizar na figura 7.30.

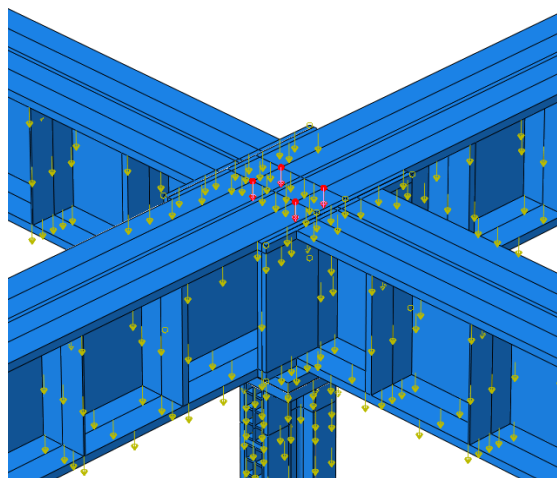


Figura 7.30 - Aplicação da carga de ensaio do pilar

7.4 Anexo IV – Estudo da evolução da temperatura para o pilar com a alma paralela à parede (carregamento de 60%)

Perfil com a alma paralela à parede de alvenaria (60% de valor de carregamento).

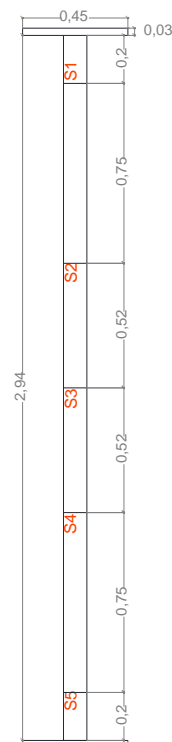
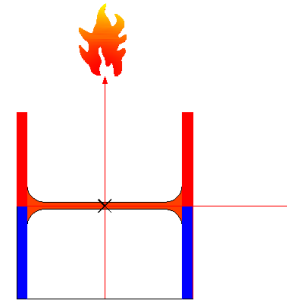


Figura 7.31 - Divisões das secções no pilar

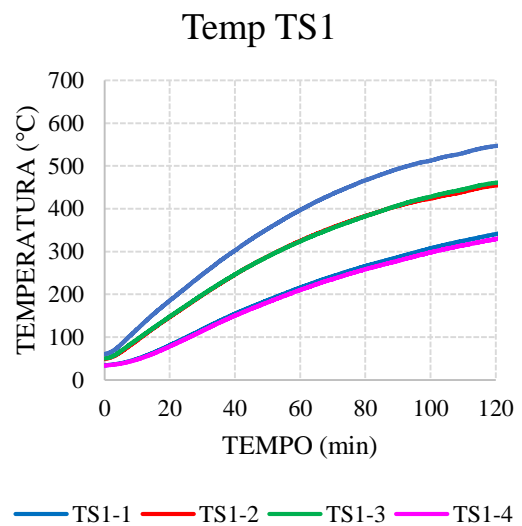


Figura 7.32 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 1

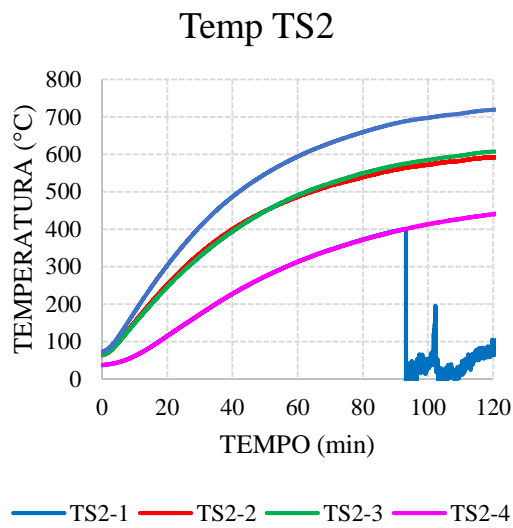


Figura 7.33 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 2

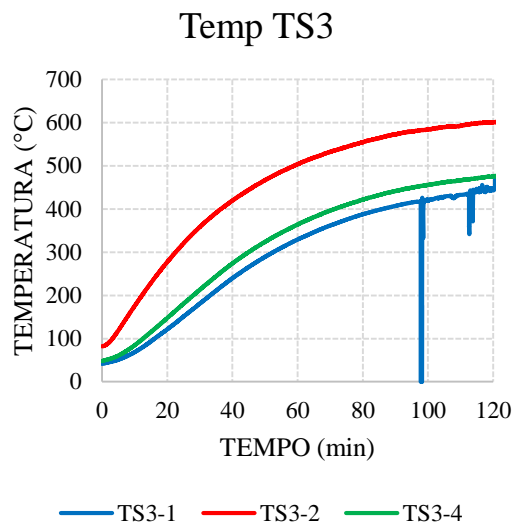


Figura 7.34 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 3

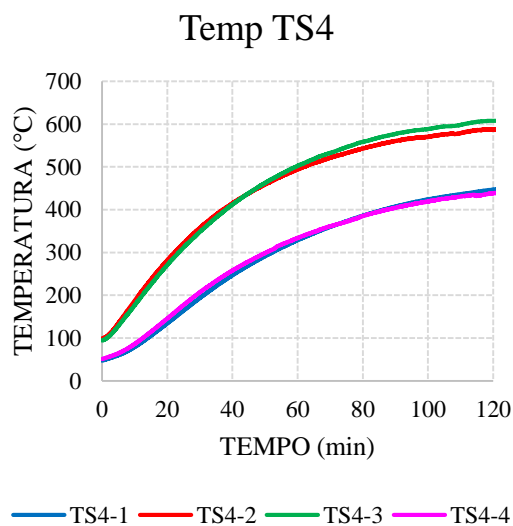


Figura 7.35 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 4

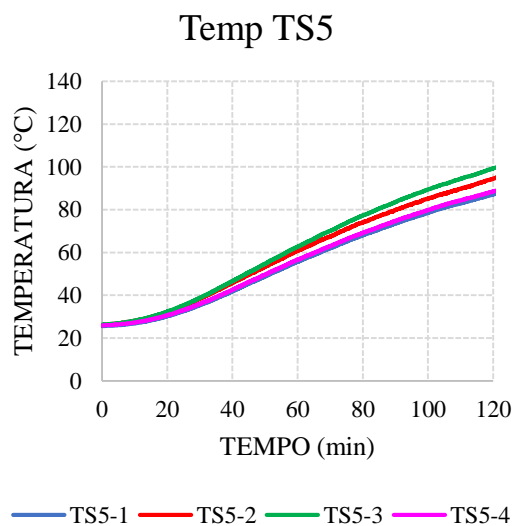


Figura 7.36 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 5

7.5 Anexo V – Estudo da evolução da temperatura para o pilar com a alma perpendicular à parede (carregamento de 30%)

Perfil com a alma perpendicular à parede de alvenaria (30% de valor de carregamento).

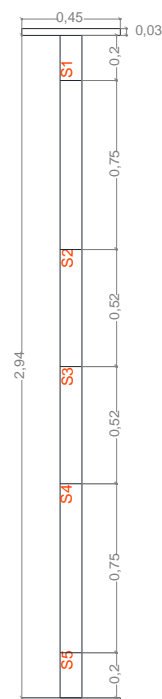
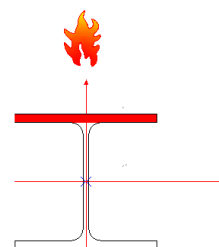


Figura 7.37 - Divisões das secções no pilar

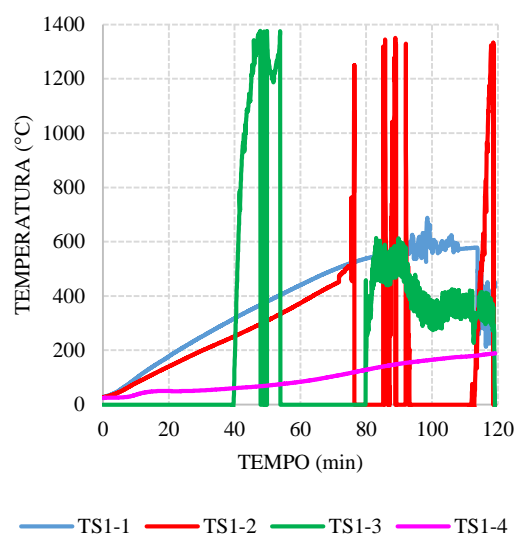


Figura 7.38 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 1

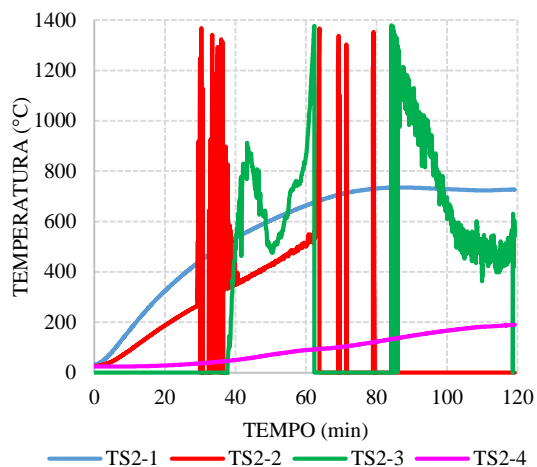


Figura 7.39 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 2

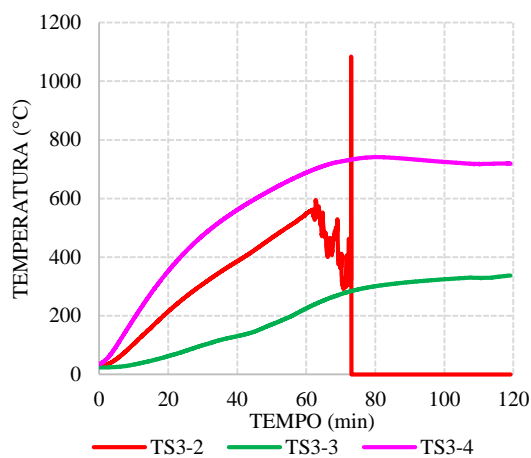


Figura 7.40 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 3

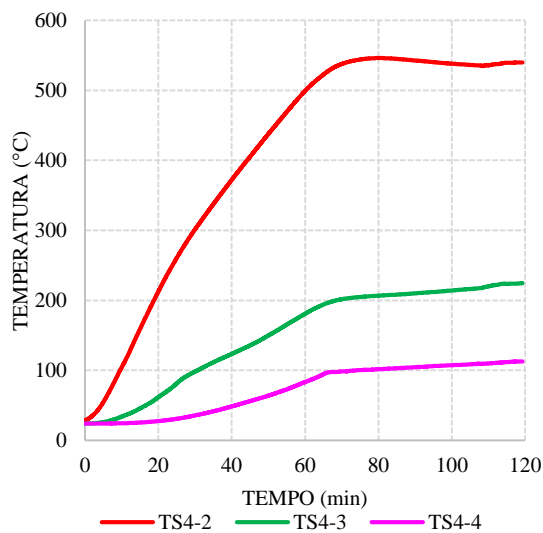


Figura 7.41 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 4

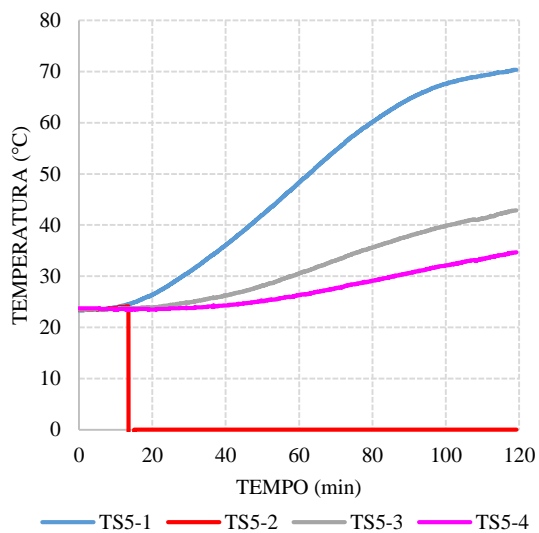


Figura 7.42 - Evolução das temperaturas a meia altura do perfil para a secção 5

7.6 Anexo VI – Imagens das simulações numéricas

Seguidamente apresentam-se figuras da simulação numérica para o pilar isolado.

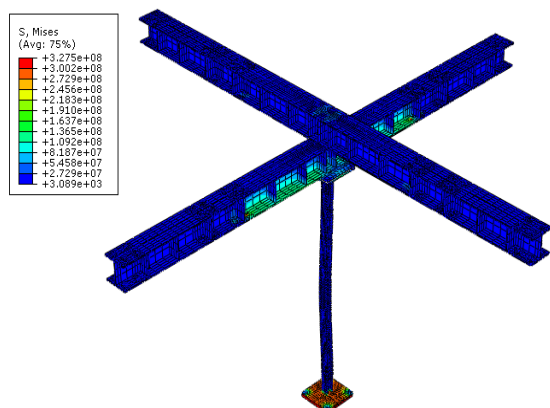


Figura 7.43 - Tensões de Von Mises para a simulação sem *piston*

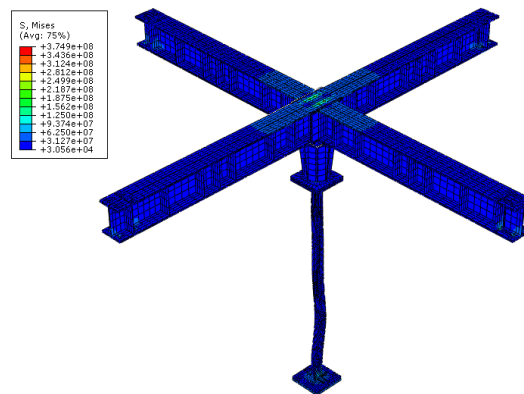


Figura 7.44 - Tensões de Von Mises para a simulação com *piston*

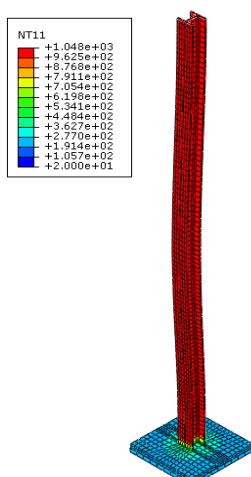


Figura 7.45 - Temperaturas para a simulação sem *piston*

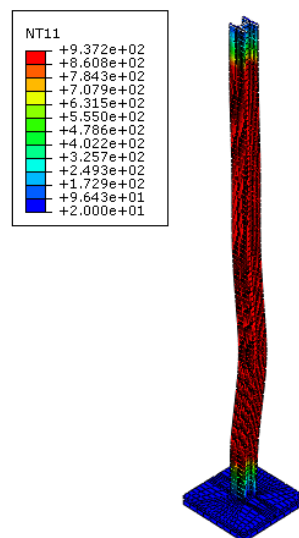


Figura 7.46 - Temperaturas para a simulação com *piston*

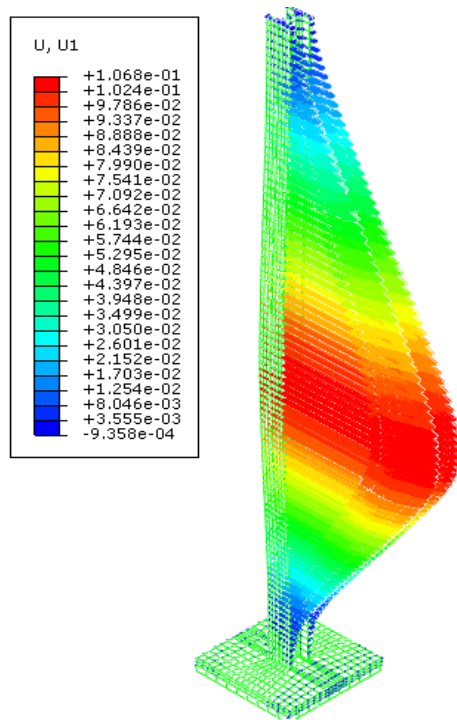


Figura 7.47 - Deslocamentos laterais para a simulação sem *piston*

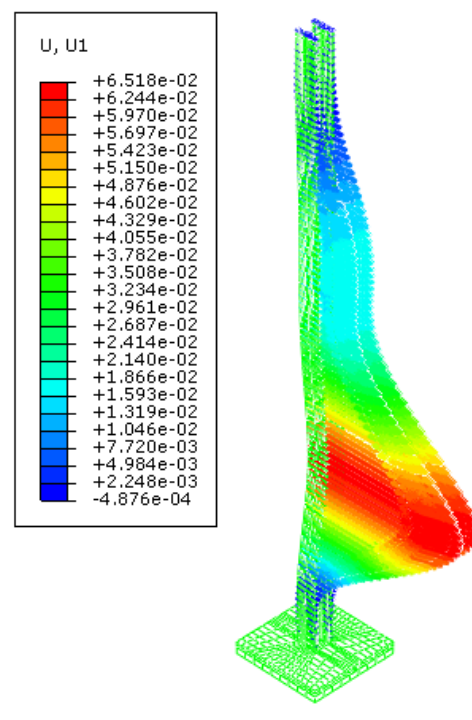


Figura 7.48 - Deslocamentos laterais para a simulação com *piston*

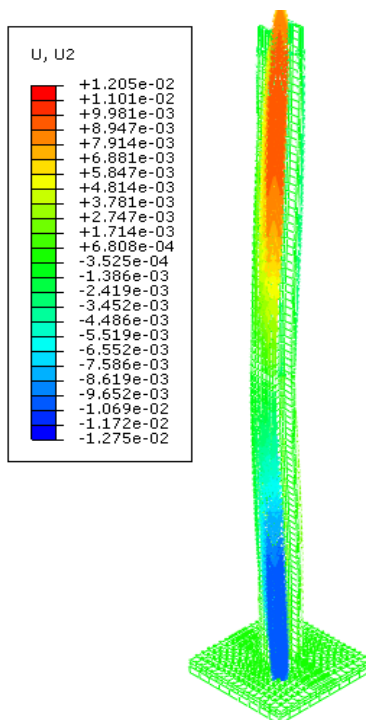


Figura 7.49 - Deslocamentos verticais para a simulação sem *piston*

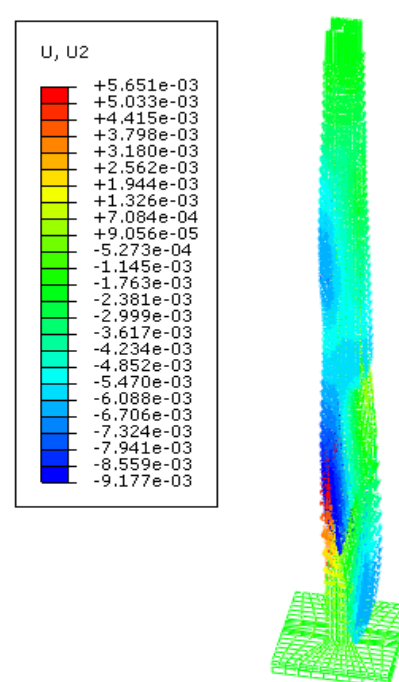


Figura 7.50 - Deslocamentos verticais para a simulação com *piston*

As figuras seguintes possibilitam a visualização da interação entre elementos, convecção térmica e radiação na parede e pilar, no modelo onde se reproduziu as condições de ensaios experimentais.

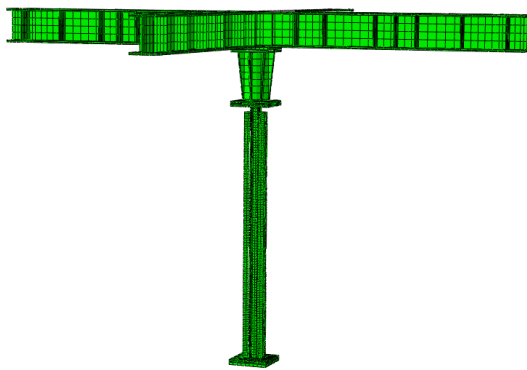


Figura 7.51 - Vista global

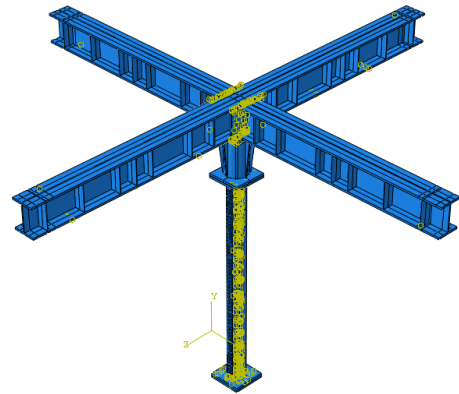


Figura 7.52 - Vista global, observa-se as interações

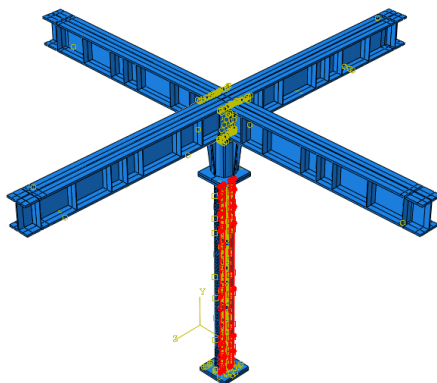


Figura 7.53 - Aplicação da convecção e radiação à parede

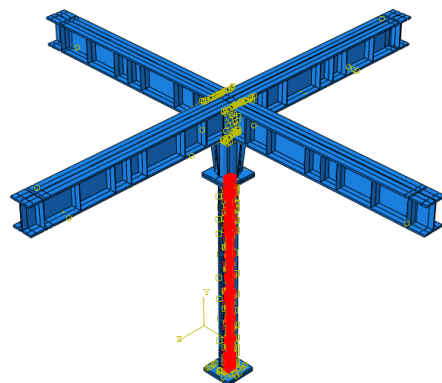


Figura 7.54 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar

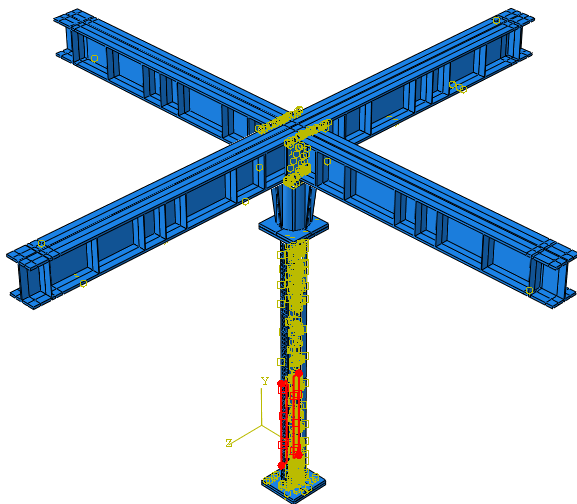


Figura 7.55 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao primeiro módulo do forno

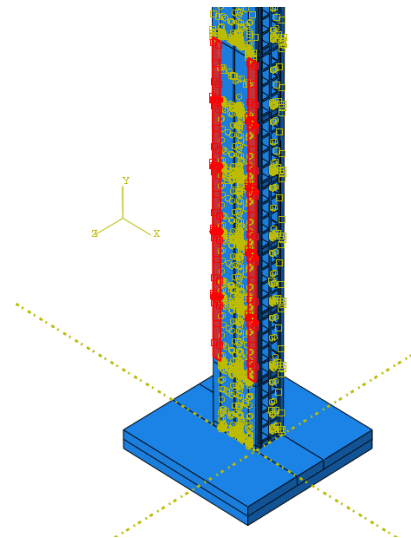


Figura 7.56 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao primeiro módulo do forno - pormenor

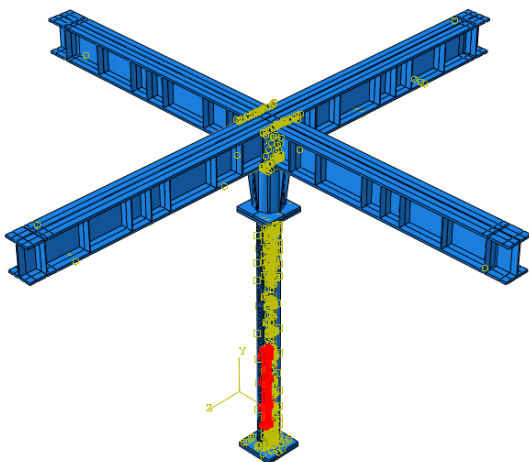


Figura 7.57 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao primeiro módulo do forno

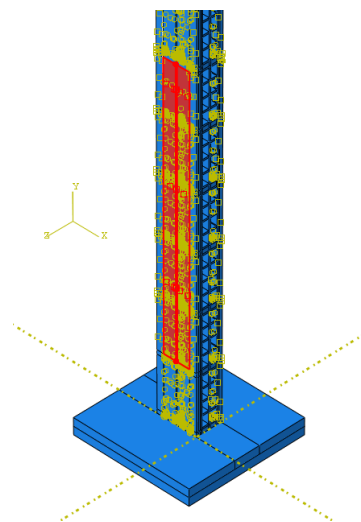


Figura 7.58 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao primeiro módulo do forno - pormenor

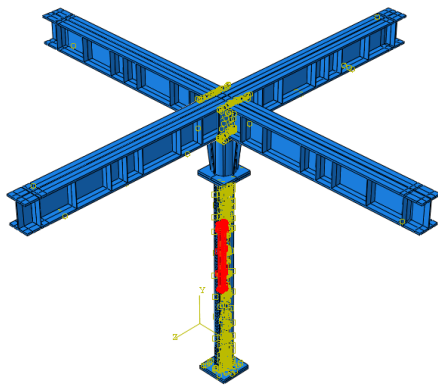


Figura 7.59 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao segundo módulo do forno

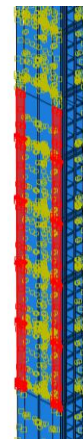


Figura 7.60 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao segundo módulo do forno - pormenor

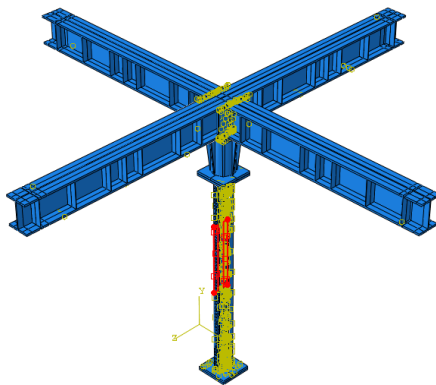


Figura 7.61 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao segundo módulo do forno

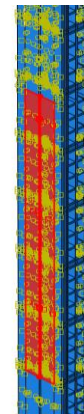


Figura 7.62 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao segundo módulo do forno-pormenor

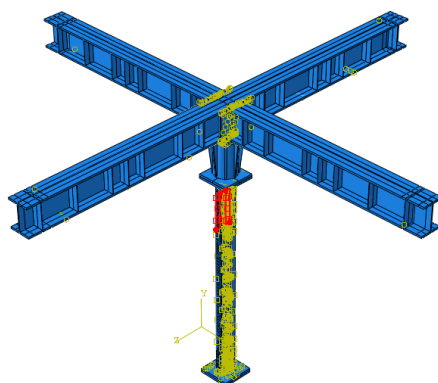


Figura 7.63 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao terceiro módulo do forno

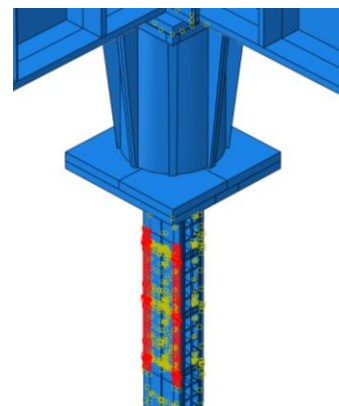


Figura 7.64 - Aplicação da convecção e radiação à parede referente ao terceiro módulo do forno - pormenor

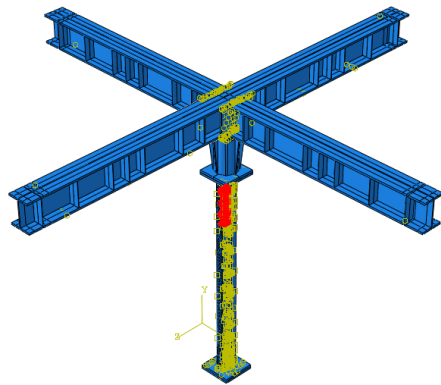


Figura 7.65 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao terceiro módulo do forno

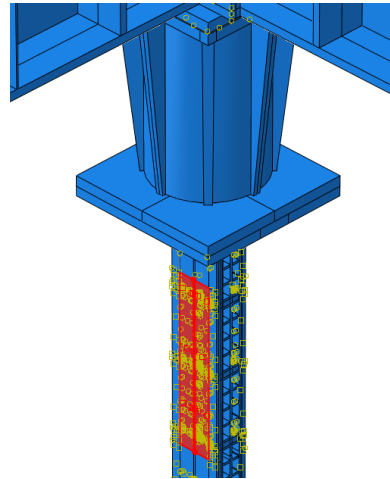


Figura 7.66 - Aplicação da convecção e radiação ao pilar referente ao terceiro módulo do forno -pormenor

As figuras seguintes permitem a visualização das temperaturas nos ensaios.

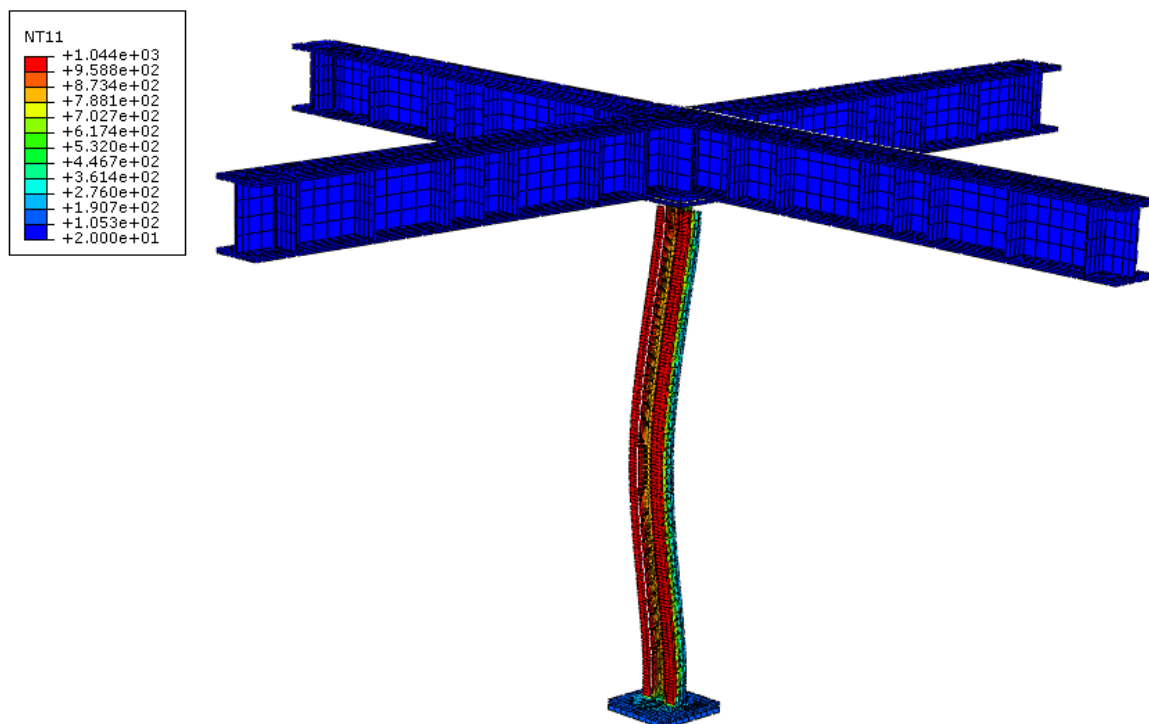


Figura 7.67 - Vista global para observação das temperaturas, caso com a alma paralela à parede – parte aquecida

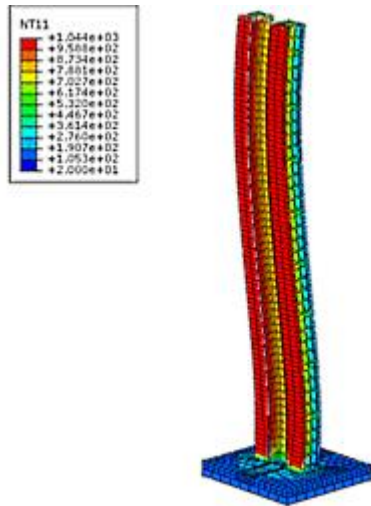


Figura 7.68 - Vista pormenorizada das temperaturas (a meia altura), caso com a alma paralela à parede – parte aquecida

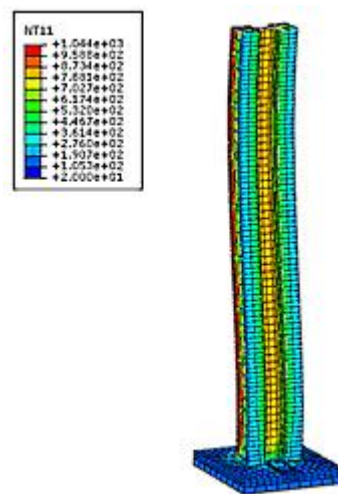


Figura 7.69 - Vista pormenorizada das temperaturas (a meia altura), caso com a alma paralela à parede – parte não aquecida

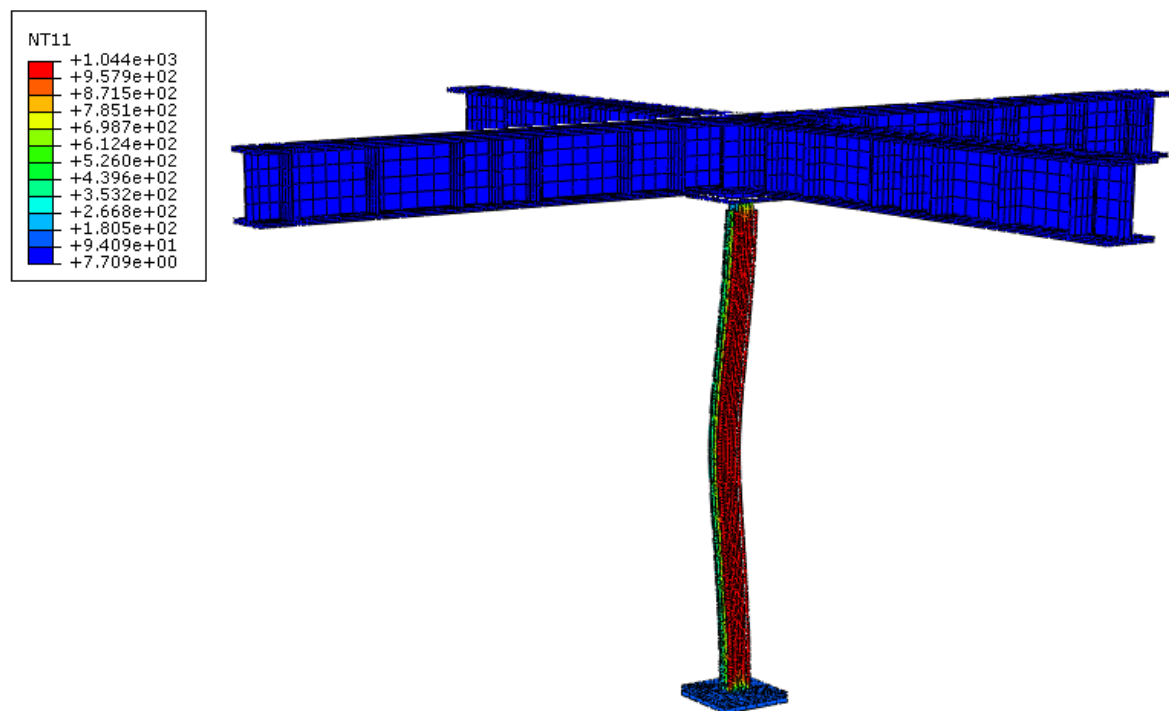


Figura 7.70 - Vista global para visualização das temperaturas, caso com a alma perpendicular à parede – parte aquecida

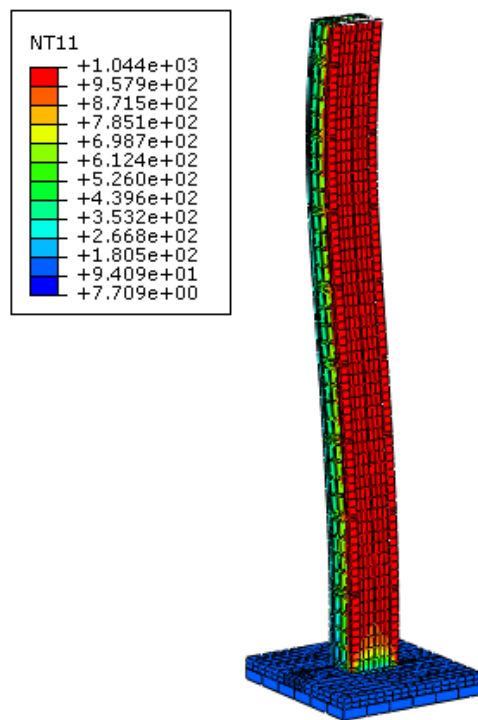


Figura 7.71 - Vista pormenorizada das temperaturas (a meia altura), caso com a alma perpendicular à parede – parte aquecida

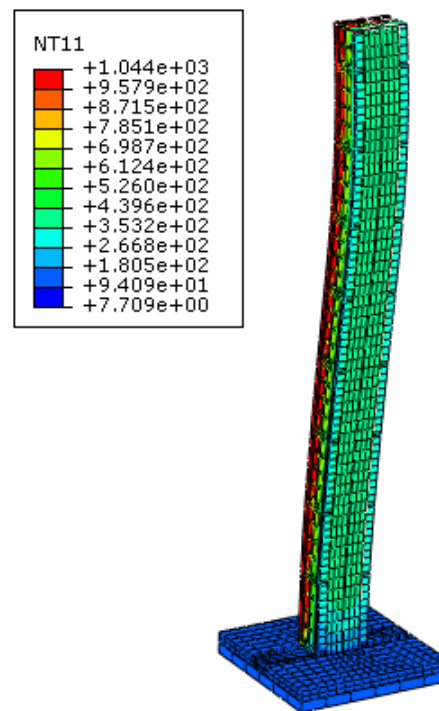


Figura 7.72 - Vista pormenorizada das temperaturas (a meia altura), caso com a alma perpendicular à parede – parte não aquecida

As imagens seguintes mostram como foram retiradas do ABAQUS as tensões verticais dos elementos finitos no topo do pilar que, posteriormente após se efetuar a integração e multiplicação pela área do respetivo elemento (banzos e alma) se obteve o esforço axial no topo do pilar.

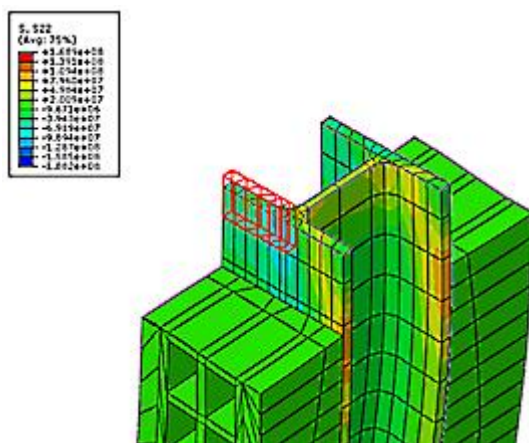


Figura 7.73 - Seleção das tensões verticais para o meio banzo exposto, caso do pilar com a alma paralela à parede

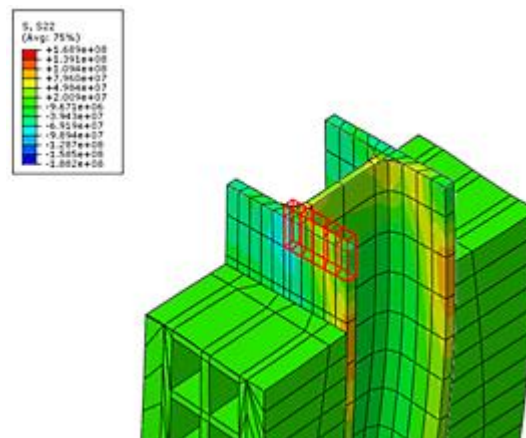


Figura 7.74 - Seleção das tensões verticais para o meio banzo não exposto

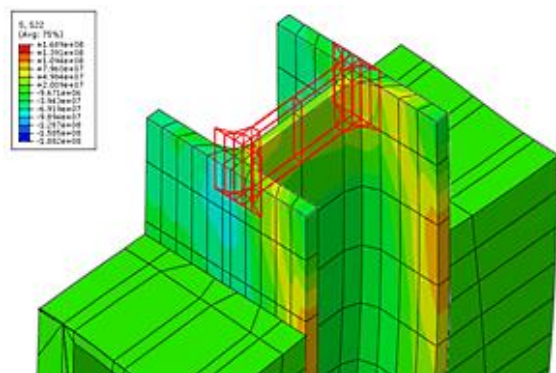


Figura 7.75 - Seleção das tensões verticais para a alma, caso do pilar com a alma paralela à parede

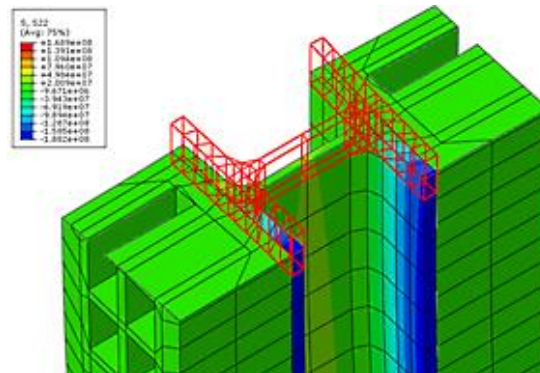


Figura 7.76 - Seleção das tensões verticais para toda a secção do perfil (a meia altura), caso do pilar com a alma paralela à parede

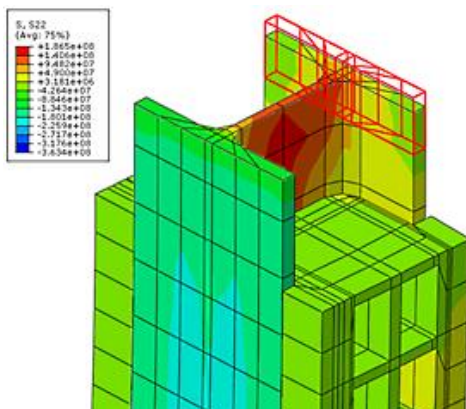


Figura 7.77 - Seleção das tensões verticais para o banzo exposto, caso do pilar com a alma perpendicular à parede

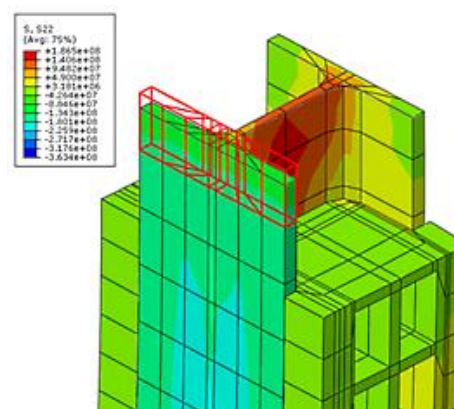


Figura 7.78 - Seleção das tensões verticais para o banzo não exposto, caso do pilar com a alma perpendicular à parede

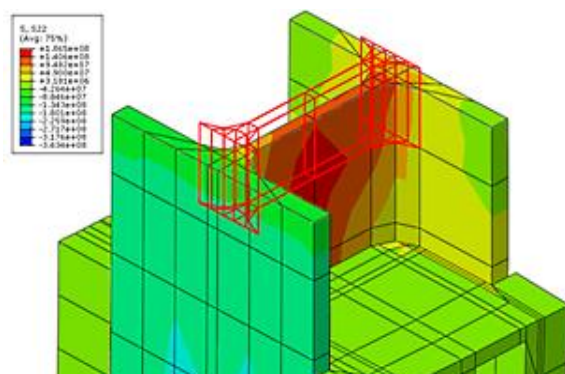


Figura 7.79 - Seleção das tensões verticais para a alma, caso do pilar com a alma perpendicular à parede

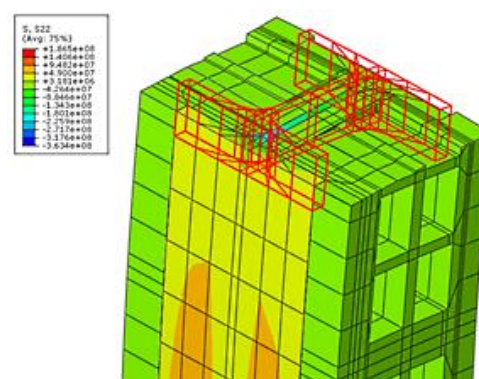


Figura 7.80 - Seleção das tensões verticais para toda a secção do perfil (a meia altura), caso do pilar com a alma perpendicular à parede

As figuras seguintes permitem a visualização dos deslocamentos laterais nos ensaios numéricos.

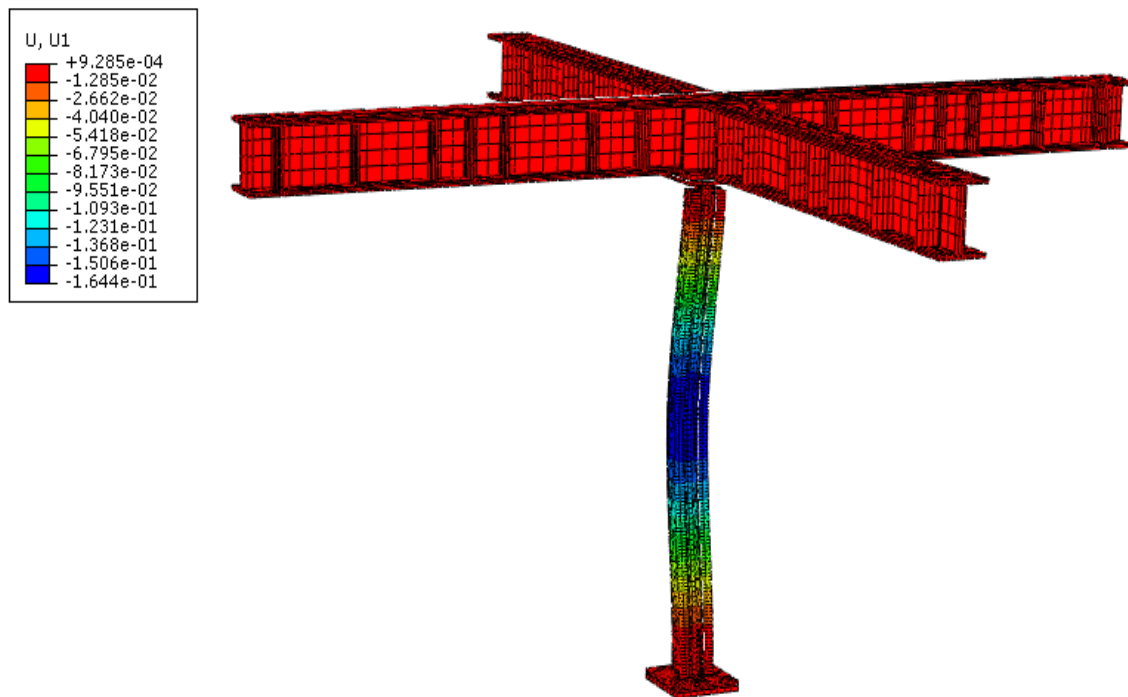


Figura 7.81 - Vista global para observação dos deslocamentos verticais, caso com a alma paralela à parede

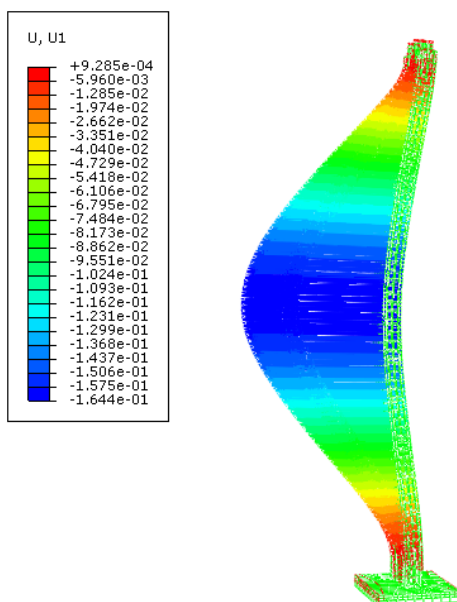


Figura 7.82 - Pormenorização dos deslocamentos laterais caso com a alma paralela à parede

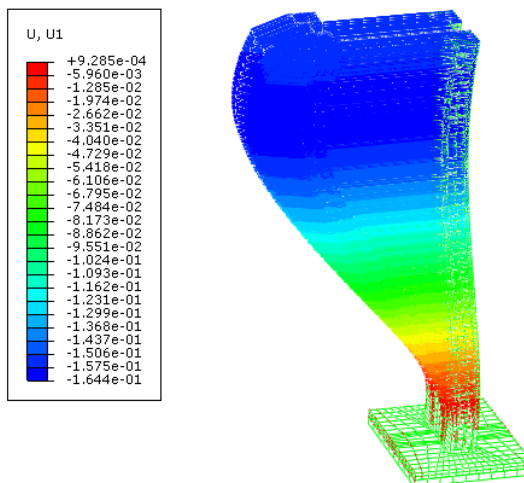


Figura 7.83 - Pormenorização dos deslocamentos laterais, a meia altura do pilar caso com a alma paralela à parede

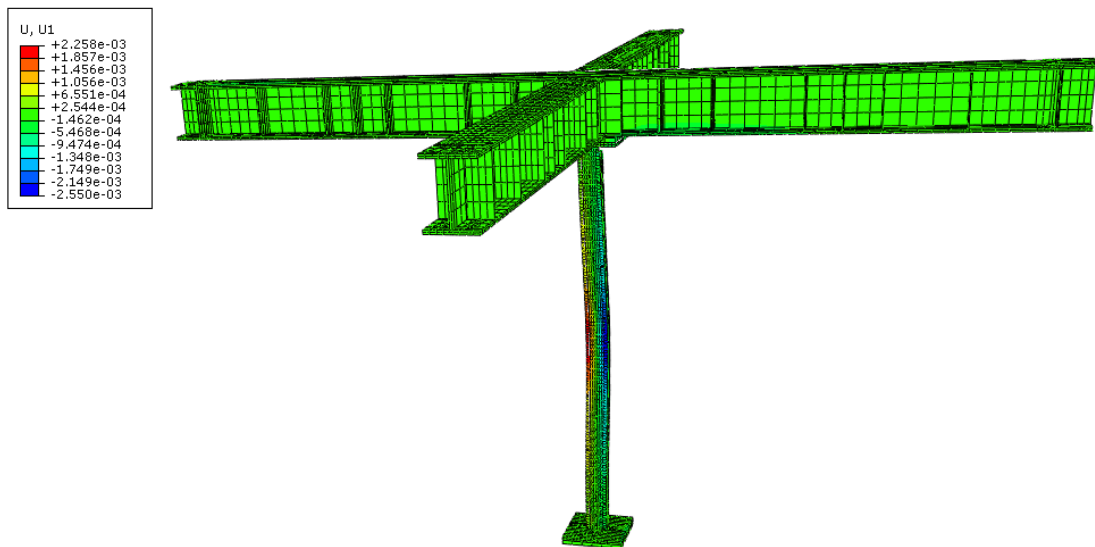


Figura 7.84 - Vista global para visualização dos deslocamentos laterais, caso com a alma perpendicular à parede

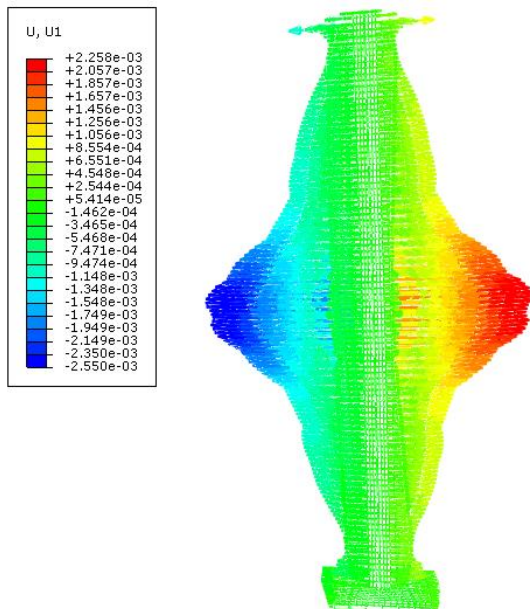


Figura 7.85 - Pormenorização dos deslocamentos laterais caso com a alma perpendicular à parede

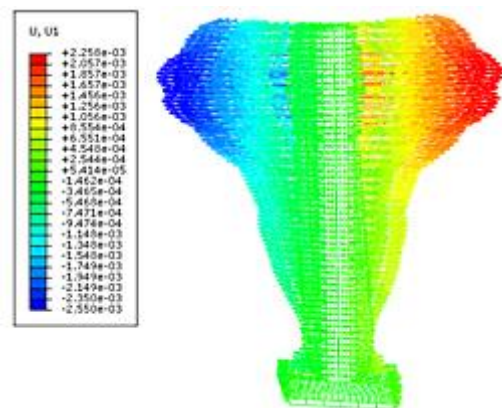


Figura 7.86 - Pormenorização dos deslocamentos laterais, a meia altura do pilar caso com a alma perpendicular à parede

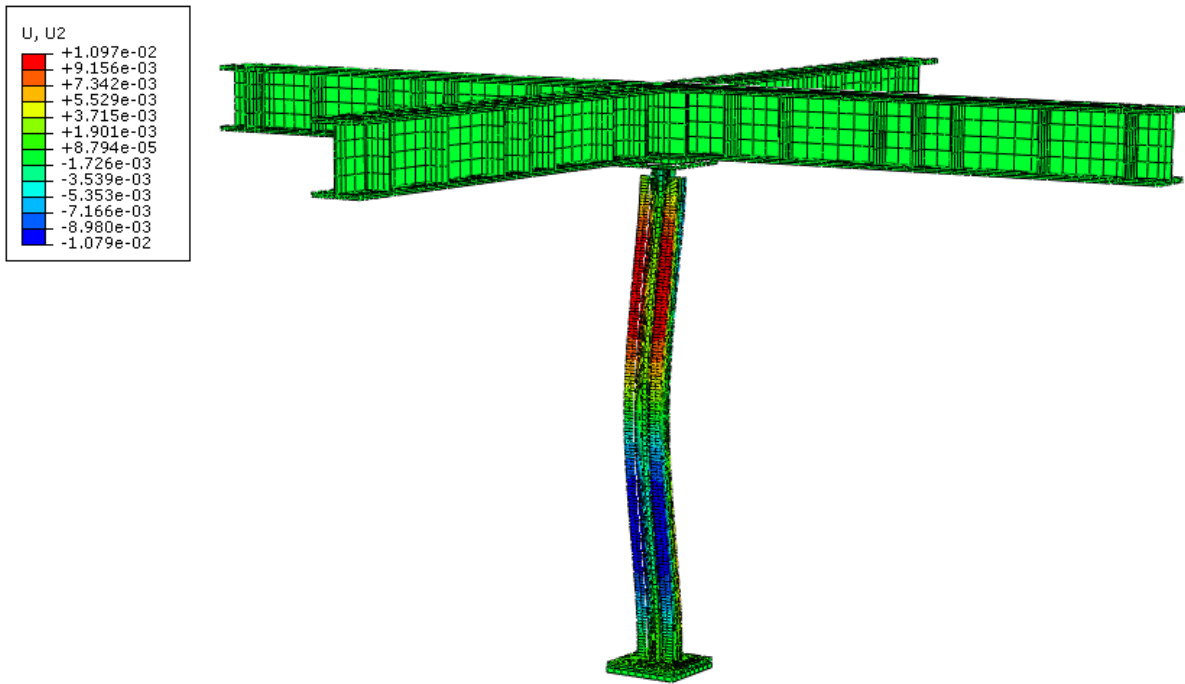


Figura 7.87 - Vista global para visualização dos deslocamentos verticais, caso com a alma paralela à parede

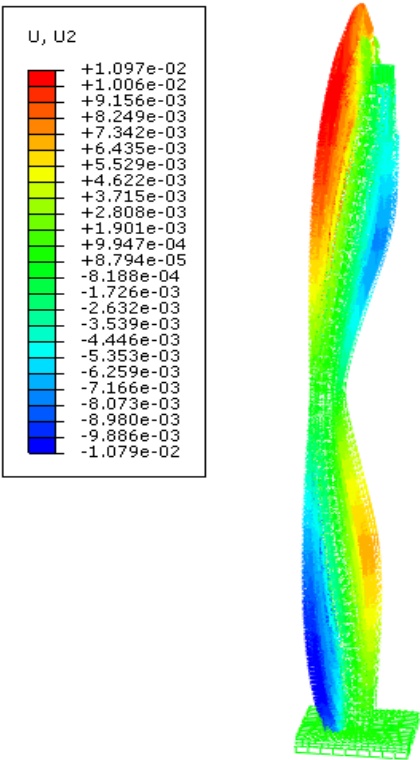


Figura 7.88 - Pormenorização dos deslocamentos verticais caso com a alma paralela à parede

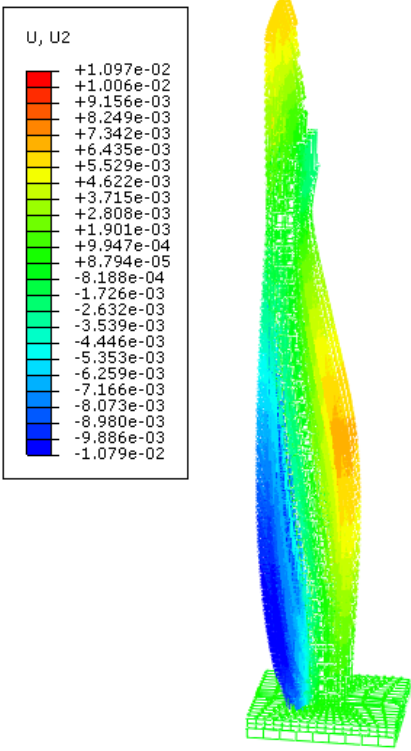


Figura 7.89 - Pormenorização dos deslocamentos verticais, a meia altura do pilar caso com a alma paralela à parede

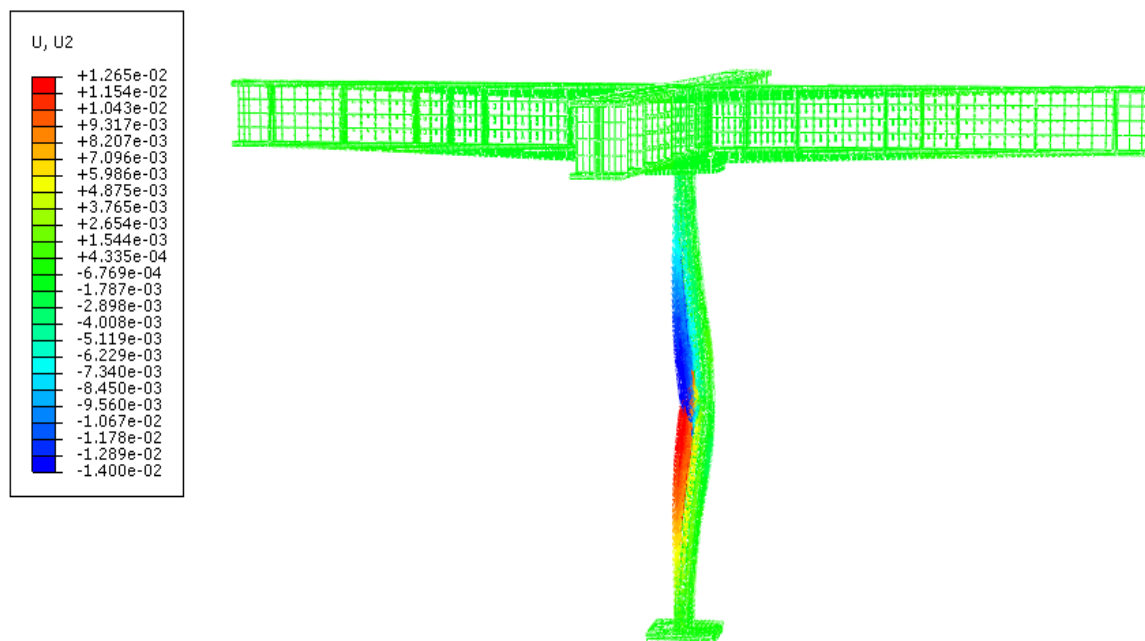


Figura 7.90 - Vista global para visualização dos deslocamentos verticais, caso com a alma perpendicular à parede

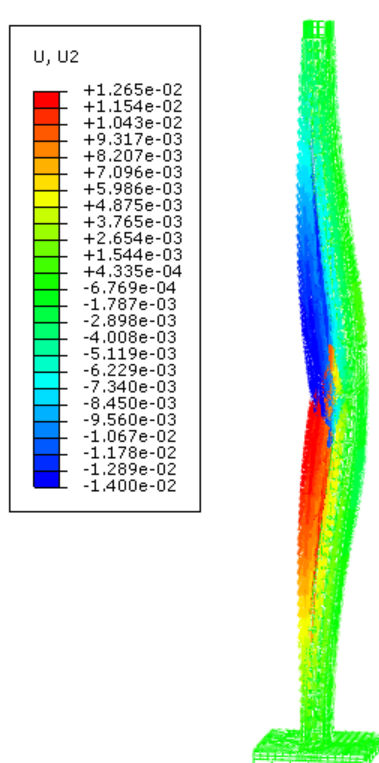


Figura 7.91 - Pormenorização dos deslocamentos verticais caso com a alma perpendicular à parede

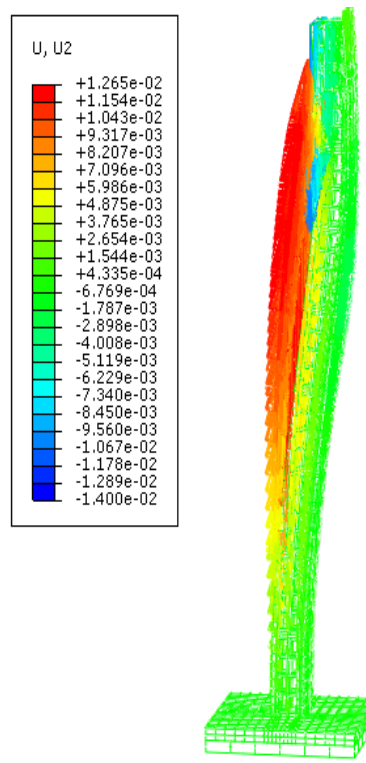


Figura 7.92 - Pormenorização dos deslocamentos verticais, a meia altura do pilar caso com a alma perpendicular à parede

Deformadas para os dois casos de estudo e para diferentes instantes.

Caso da alma paralela à parede de alvenaria (30%).

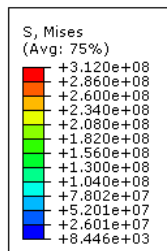


Figura 7.93 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=0 min

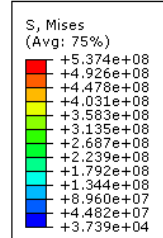


Figura 7.94 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=20 min

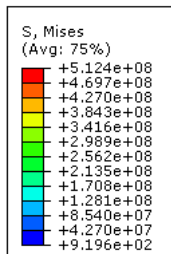


Figura 7.95 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=40 min

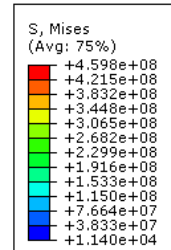


Figura 7.96 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=60 min

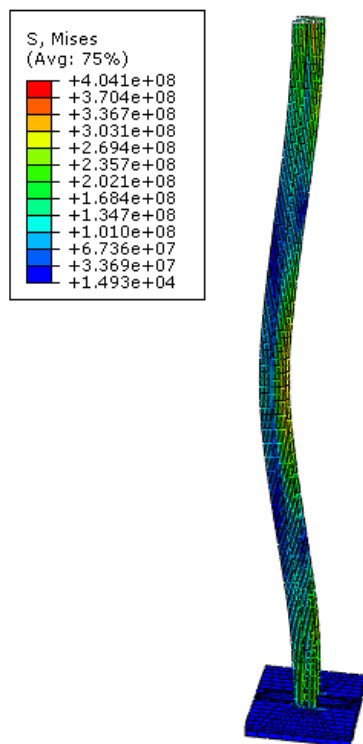


Figura 7.97 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=80 min

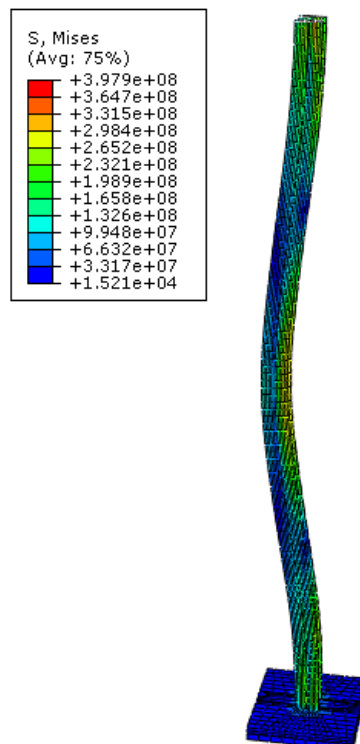


Figura 7.98 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=100 min

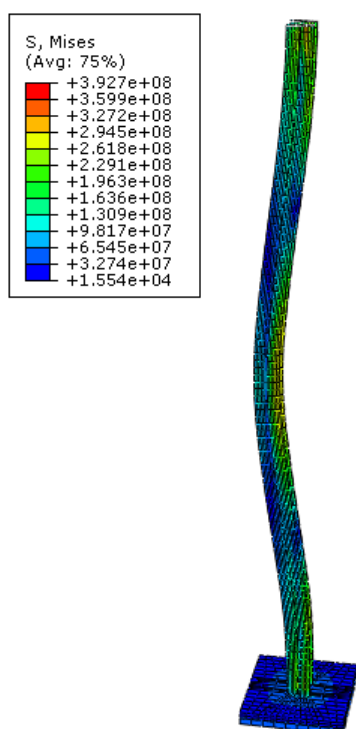


Figura 7.99 - Deformada do pilar com a alma paralela à parede para t=120 min

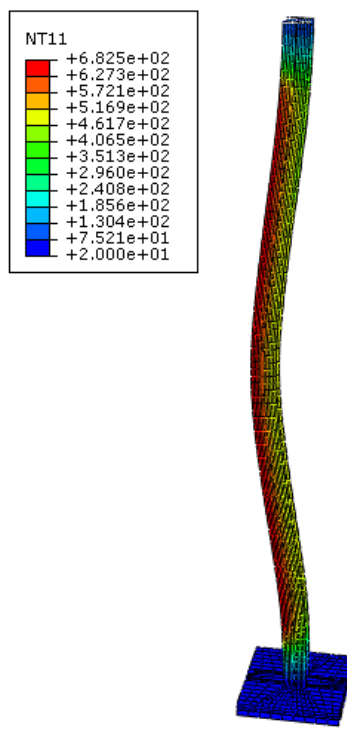


Figura 7.100 - Temperaturas para a deformada final

Caso da alma perpendicular à parede de alvenaria (30%).

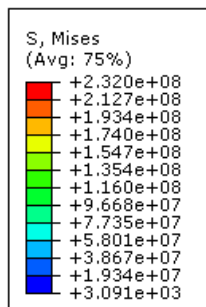


Figura 7.101 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=0 min

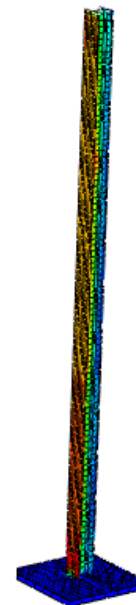
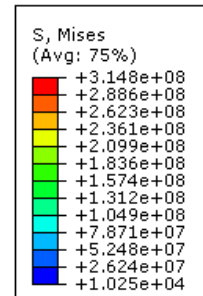


Figura 7.102 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=20 min

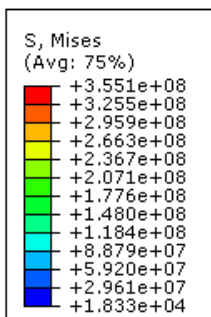


Figura 7.103 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=40 min

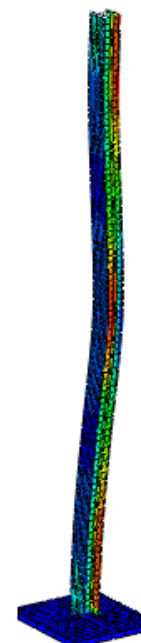
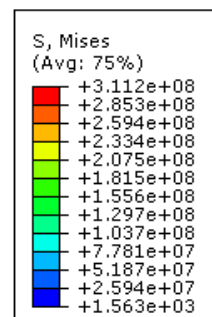


Figura 7.104 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=60 min

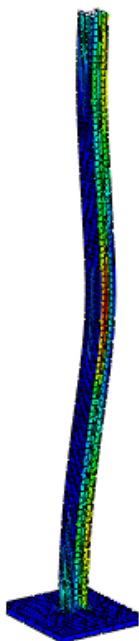
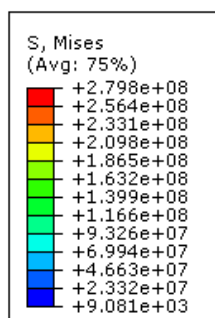


Figura 7.105 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=80 min

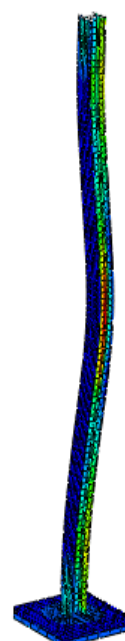
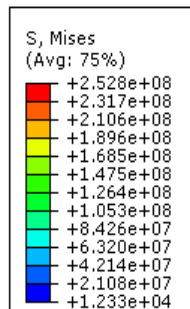


Figura 7.106 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=100 min

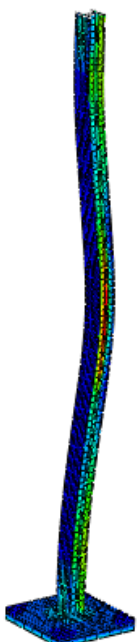
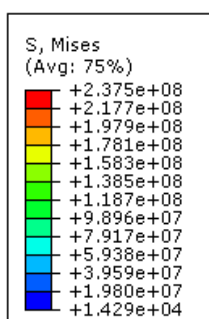


Figura 7.107 - Deformada do pilar com a alma perpendicular à parede para t=120 min

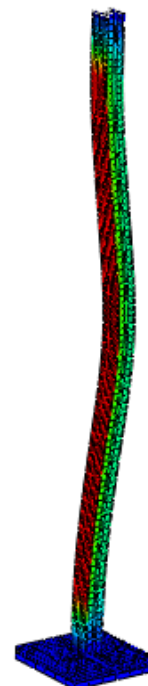
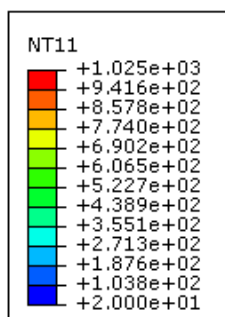


Figura 7.108 - Temperaturas para a deformada final

Seguidamente apresentam-se as imagens das simulações numéricas dos ensaios experimentais e as simulações numéricas sem *piston*.

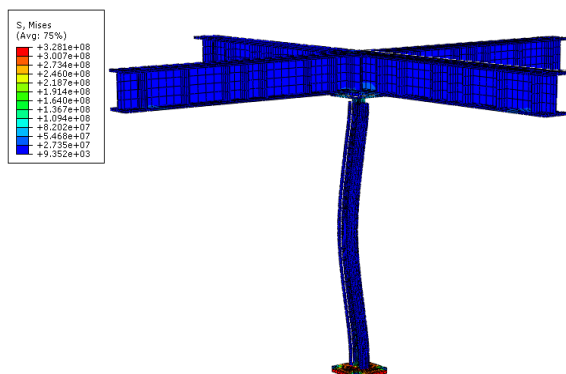


Figura 7.109 - Tensões de Von Mises para a simulação sem *piston*, caso com a alma paralela à parede

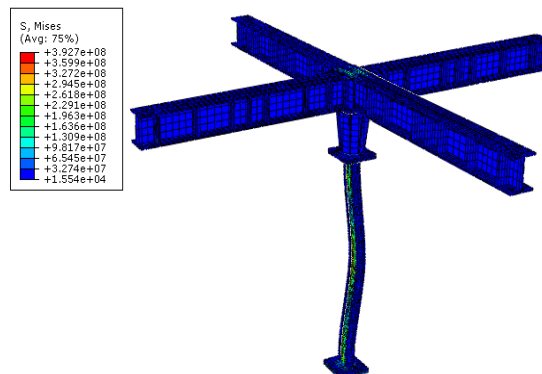


Figura 7.110 - Tensões de Von Mises para a simulação com *piston*, caso com a alma paralela à parede

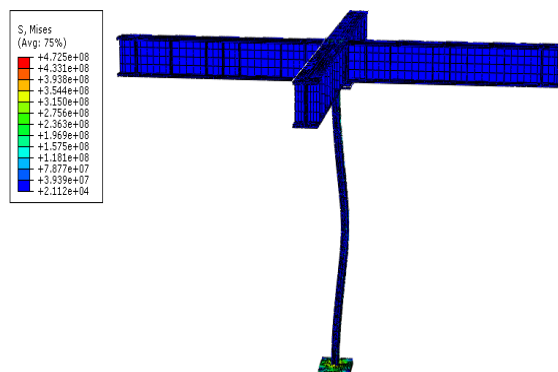


Figura 7.111 - Tensões de Von Mises para a simulação sem *piston*, caso com a alma perpendicular à parede

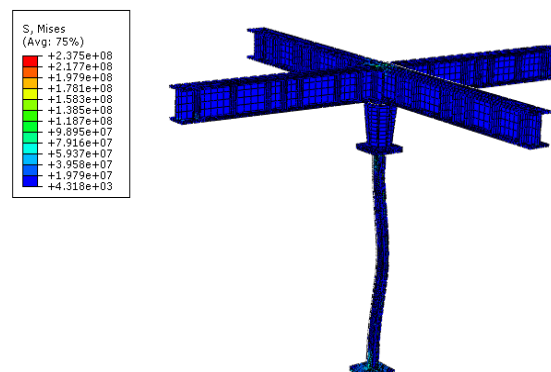


Figura 7.112 - Tensões de Von Mises para a simulação com *piston*, caso com a alma perpendicular à parede

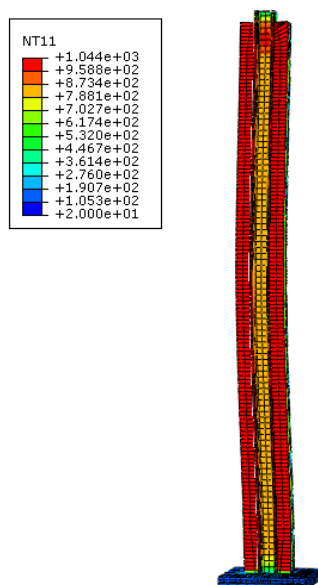


Figura 7.113 - Temperaturas para a simulação sem *piston*, caso com a alma paralela à parede

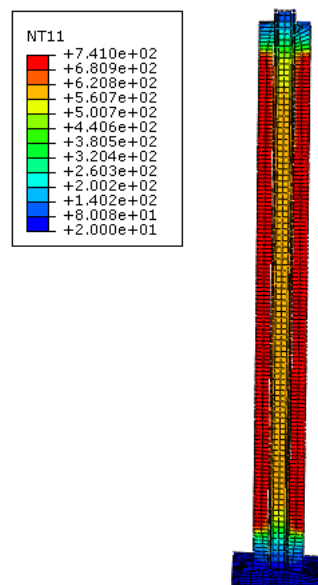


Figura 7.114 - Temperaturas para a simulação com *piston*, caso com a alma paralela à parede

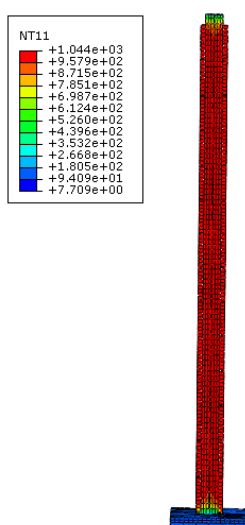


Figura 7.115 - Temperaturas para a simulação sem *piston*, caso com a alma perpendicular à parede

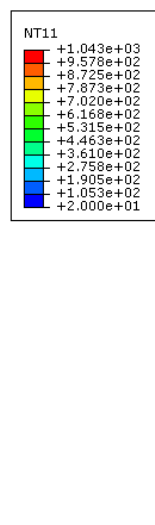


Figura 7.116 - Temperaturas para Von Mises para a simulação com *piston*, caso com a alma perpendicular à parede

